

Aus der Klinik für Neurologie
(Direktor: Prof. Dr. med. G. Deuschl)
im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**SCHLAF UND PLASTIZITÄT:
UNTERSUCHUNGEN ZUR GENERALISIERUNG
EINER FERTIGKEIT DURCH KONSOLIDIERUNG IM
MOTORISCHEN SYSTEM**

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
CHRISTINA BIEBER
aus
Ehringshausen

Kiel 2010

1. Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr. K. Witt, Klinik für Neurologie
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Dr. L. Baving, Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie
Tag der mündlichen Prüfung:	08. Dezember 2010
Zum Druck genehmigt,	Kiel, den 29.09.2010
gez.	Prof. Dr. Dr. I. Cascorbi, Vorsitzender des Ausschusses für Promotion

Für meine Familie

INHALTSVERZEICHNIS

GLOSSAR	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VI
TABELLENVERZEICHNIS	VII
 1 EINLEITUNG	 - 1 -
1.1 MOTORISCHES LERNEN.....	- 2 -
1.1.1 Motorisches Lernen – prozedural und implizit.....	- 2 -
1.1.2 Motorisches Lernen – neuronale Grundlagen.....	- 3 -
1.2 SCHLAF UND SEINE BEDEUTUNG FÜR DAS MOTORISCHE LERNEN	- 4 -
1.2.1 Schlafgebundene Performancesteigerung der motorischen Fertigkeit-	5 -
1.2.2 Stabilisierung eines Gedächtnispfades	- 7 -
1.2.3 Generalisierung einer motorischen Fertigkeit.....	- 8 -
1.3 VERSCHIEDENE TASKS UND DEREN EINSATZ IN STUDIEN	- 11 -
1.3.1 Serial-Reaction-Time-Task	- 11 -
1.3.2 Sequenzieller Finger-Tapping-Task.....	- 12 -
1.4 FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT	- 12 -
 2 PROBANDEN, MATERIAL UND METHODEN	 - 14 -
2.1 PROBANDENAUSWAHL	- 14 -
2.2 STUDIENDESIGN.....	- 15 -
2.3 SEQUENZIELLER FINGER-TAPPING-TASK.....	- 17 -
2.4 POLYSOMNOGRAPHIE	- 19 -
2.5 FRAGEBÖGEN ZU WACHHEIT UND SCHLAFQUALITÄT	- 20 -
2.5.1 Stanford Sleepiness Scale (SSS).....	- 20 -
2.5.2 Eigenschaftswörterliste (N).....	- 20 -
2.5.3 Pittsburgh-Schlafqualitätsindex (PSQI).....	- 22 -

2.6	FRAGEBÖGEN ZU HÄNDIGKEIT UND AUSSCHLUSSKRITERIEN	- 22 -
2.6.1	Händigkeitstest nach Oldfield.....	- 22 -
2.6.2	Fragebogen zu den Ausschlusskriterien.....	- 23 -
2.7	STATISTISCHE ANALYSEN	- 23 -
3	ERGEBNISSE	- 25 -
3.1	PROBANDENKOLLEKTIV	- 25 -
3.2	DIE PERFORMANCE DER GRUPPEN IM VERGLEICH.....	- 26 -
3.2.1	Performance während des Trainings.....	- 26 -
3.2.2	Performance des Transfers direkt nach dem Training.....	- 28 -
3.2.3	Performance nach der off-line Konsolidierung über Tag	- 29 -
3.2.4	Performance nach der off-line Konsolidierung über Nacht	- 30 -
3.3	SCHLAF UND SUBJEKTIVE SKALEN.....	- 34 -
3.3.1	Aktiviertheit der Probanden nach SSS und EWL.....	- 34 -
3.3.2	Vergleich der Schlafqualität der Probanden nach dem PSQI	- 36 -
3.3.3	Vergleich der Schlafdaten	- 36 -
4	DISKUSSION	- 38 -
4.1	DISKUSSION DER METHODIK	- 38 -
4.1.1	Konsolidierungsphasen über Tag.....	- 38 -
4.1.2	Tageszeitliche Effekte auf die Performance	- 39 -
4.1.3	Einfluss der verschiedenen Sequenzen.....	- 39 -
4.1.4	Einfluss der Dauer der aktiven Lernphase	- 40 -
4.2	DIE TRANSFER-EFFEKTE IM VERGLEICH	- 40 -
4.2.1	Akute Transfer-Effekte im motorischen System	- 40 -
4.2.2	Die Rolle des Tages im motorischen Transfer	- 41 -
4.2.3	Die Rolle der Nacht im motorischen Transfer.....	- 43 -
4.3	FAZIT UND AUSBLICK	- 44 -
5	ZUSAMMENFASSUNG	- 45 -

6	VERÖFFENTLICHUNGEN	- 47 -
----------	---------------------------	---------------

7	LITERATURVERZEICHNIS	- 48 -
----------	-----------------------------	---------------

8	ANHANG	- 54 -
----------	---------------	---------------

8.1	EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG DER PROBANDEN	- 54 -
8.2	SCORES UND FRAGEBÖGEN	- 55 -
8.2.1	Stanford Sleepiness Scale (SSS)	- 55 -
8.2.2	Eigenschaftswörterliste (N)	- 56 -
8.2.3	Pittsburgh-Schlafqualitätsindex (PSQI)	- 61 -
8.2.4	Händigkeitstest nach Oldfield	- 65 -
8.2.5	Fragebogen zu den Ausschlusskriterien	- 66 -
8.3	ZUORDNUNG PROBAND – VERSION	- 68 -

9	DANKSAGUNG	- 70 -
----------	-------------------	---------------

10	LEBENS LAUF	- 71 -
-----------	--------------------	---------------

Glossar

Im Folgenden werden Erklärungen und die verwendeten Abkürzungen aufgelistet; allgemein übliche Abkürzungen wie „z. B.“ werden nicht erwähnt.

ANOVA	Varianzanalyse (ANalysis Of VAriance) - statistischer Test
DGSM.....	Deutsche Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin
EEG.....	Elektroenzephalogramm - Aufzeichnung des Verlaufs von Makrorhythmen als ableitbares Summenpotenzial zerebraler Potenzialschwankungen
Effektor-abhängig.....	intrinsische Übertragung, hier → die erlernte <i>Fingerbewegung</i> bleibt bei der Übertragung von einer auf die andere Hand dieselbe
Effektor-unabhängig	extrinsische Übertragung, hier → die erlernte <i>Reihenfolge der Tastenanschläge</i> bleibt bei der Übertragung von einer auf die andere Hand dieselbe
EWL	Eigenschaftswörterliste – Test zur Erfassung von Motivation, Aktiviertheit, Disinhibition und Trägheit
explizit.....	verbal vermittelbarer und bewusst gewordener Lernprozess
extrinsisch	siehe Effektor-unabhängig
fMRT	funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie – bildgebendes Verfahren mit hoher räumlicher Auflösung zur Darstellung von aktivierten Strukturen im Gehirn
implizit	Informationsgewinn, ohne dass dieser bewusst geworden ist, somit verbal nicht vermittelbar
Interferenz	Überlagerung, Hemmung eines biologischen Vorgangs durch einen anderen
intrinsisch	siehe Effektor-abhängig
M1	primär motorischer Kortex
Non-REM-Schlaf	Non-Rapid-Eye-Movement-Schlaf
off-line Konsolidierung	Verarbeitung des Gelernten, ohne erneute Ausführung des Gelernten
Performance	Bezeichnung für die Leistung in Handlungstests
Plastizität.....	Formbarkeit, Modellierbarkeit
präSMA	präsupplementär motorische Area

prozedurales Gedächtnis	Gedächtnis für Fähigkeiten, Gewohnheiten und Verhaltensweisen, welche implizit erworben wurden
PSG.....	Polysomnographie
PSQI	Pittsburgh-Schlafqualitätsindex – Test zur Erfassung der Schlafqualität
REM-Schlaf	Rapid-Eye-Movement-Schlaf
SD	Standardabweichung – statistische Größe
SMA	supplementär motorische Area
SRTT	Serial-Reaction-Time-Task – Aufgabe zur Testung motorischer Fertigkeiten
SSS	Stanford Sleepiness Scale – Test zur Erfassung der aktuellen Schläfrigkeit
Task.....	Aufgabe zum Erlernen und zur Testung motorischer Fertigkeiten
TMS	transkranielle Magnetstimulation – nicht-invasive Technologie, bei der mithilfe starker Magnetfelder Bereiche des Gehirns sowohl stimuliert als auch gehemmt werden können
V1.....	Version 1 – Sequenz I → 2-3-1-4-2
V1M	gespiegelte Sequenz der Version 1 - Sequenz II → 3-2-4-1-3
V2.....	Version 2 - Sequenz III → 4-1-3-2-4
V2M	gespiegelte Sequenz der Version 2 - Sequenz IV → 1-4-2-3-1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Taxonomie der Gedächtnissysteme nach Squire und Zola (1996).	- 1 -
Abb. 2: Differenzierung des impliziten Lernens nach Witt et al. (2002a; 2002b).	- 2 -
Abb. 3: Schema des Lernens motorischer Fertigkeiten.	- 3 -
Abb. 4: Steigerung der Performance einer motorischen Fertigkeit.	- 6 -
Abb. 5: Zwei Wege der Konsolidierung einer motorischen Fertigkeit.	- 8 -
Abb. 6: Darstellung der Fingerbewegungen der Transferbedingungen.	- 10 -
Abb. 7: Modelle zur Formation des prozeduralen Gedächtnisses.	- 13 -
Abb. 8: Übersicht über das Studiendesign.	- 16 -
Abb. 9: Elektrodenpositionierung für die PSG nach Rechtschaffen und Kales (1968).	- 19 -
Abb. 10: Steigerung der Geschwindigkeit über die 15 Trainings-Trials.	- 26 -
Abb. 11: Reduktion der Fehlerzahl im Lauf der 15 Trials.	- 27 -
Abb. 12: Differenz der Geschwindigkeit der Gruppen 1 und 2.	- 28 -
Abb. 13: Differenz der Geschwindigkeit der Gruppen 3 und 4.	- 29 -
Abb. 14: Differenz der Geschwindigkeit der Gruppen 5 und 6.	- 30 -
Abb. 15: Überblick über die Performance in Bezug auf die Geschwindigkeit.	- 32 -
Abb. 16: Überblick über die Performance in Bezug auf die Genauigkeit.	- 33 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verteilung der Probanden	- 15 -
Tabelle 2: Items der Eigenschaftswörterliste	- 21 -
Tabelle 3: Mittlere Scores der einzelnen Gruppen	- 25 -
Tabelle 4: Gemittelte Aktivitätsgrade der Gruppen nach der SSS.....	- 34 -
Tabelle 5: Gemittelte Aktivitätsgrade der Gruppen nach der EWL – Training	- 35 -
Tabelle 6: Gemittelte Aktivitätsgrade der Gruppen nach der EWL – Abruf	- 35 -
Tabelle 7: Mittlere PSQI-Scores der einzelnen Gruppen.....	- 36 -
Tabelle 8: Schlafdaten der Nacht-Gruppen 5 und 6.....	- 37 -
Tabelle 9: Zuordnung Proband - Version der Sequenz.....	- 69 -

1 Einleitung

Durch Training von Bewegungsabläufen werden motorische Fertigkeiten erlernt. Aber was passiert nach der aktiven Übung im und mit dem Gehirn? Und welche Rolle spielt Schlaf in diesem Zusammenhang?

Das Langzeitgedächtnis kann als Menge von verbundenen Gedächtnissystemen verstanden werden (Squire und Zola 1996). Das Erinnern von Episoden und Fakten wird mit bewussten Erinnerungszuständen assoziiert und im deklarativen Gedächtnis gespeichert. Viele Erfahrungen wirken sich aber, ohne dass sie uns bewusst werden, auf unser Verhalten und Erleben aus. Diese Erfahrungsnachwirkungen werden dem nichtdeklarativen Gedächtnis zugeordnet. Hierzu gehören, wie in Abb. 1 dargestellt, die klassische Konditionierung motorischer und emotionaler Reaktionen sowie das prozedurale Gedächtnis mit dem Erwerb kognitiver und motorischer Fertigkeiten.

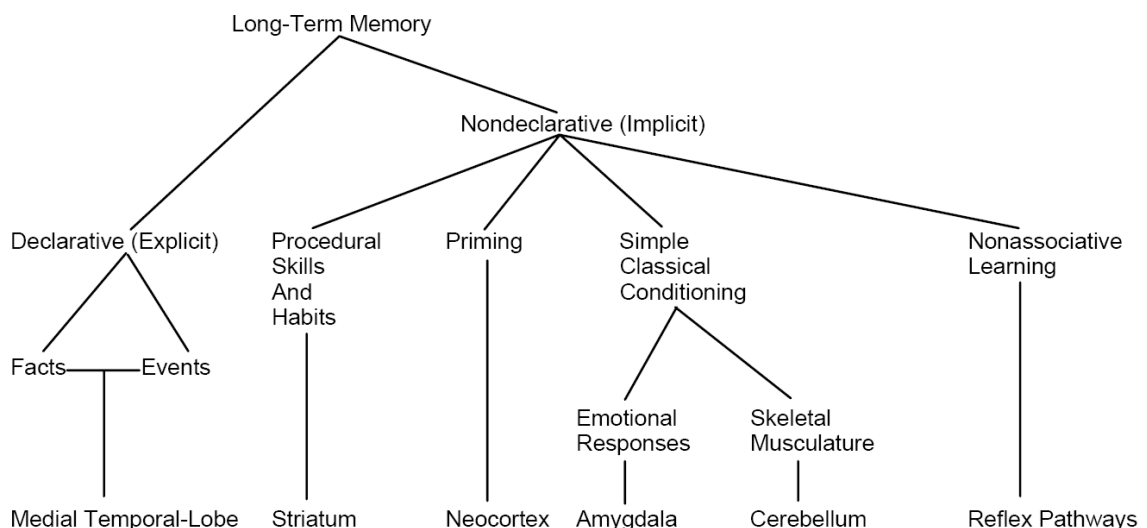


Abb. 1: Taxonomie der Gedächtnissysteme nach Squire und Zola (1996).

In der ersten Ebene des Baumdiagramms erfolgt die Unterteilung in deklaratives und nichtdeklaratives Gedächtnis, darunter folgen die jeweils zugehörigen Fertigkeiten und die beigeordneten Hirnareale.

Der Erwerb impliziter Fertigkeiten des prozeduralen Lernens und der Entwicklung von Gewohnheiten kann weiter differenziert werden (siehe Abb. 2).

Die verschiedenen Gedächtnissysteme nutzen jeweils andere Wege zur Festigung der gelernten Fertigkeit. In der Zeit zwischen zwei Lernphasen greifen Konsolidierungsprozesse in den Lernvorgang ein. Die Verarbeitung erfolgt hier ohne erneute Ausführung des Gelernten. Folglich nennt man diesen Vorgang off-line Konsolidierung.

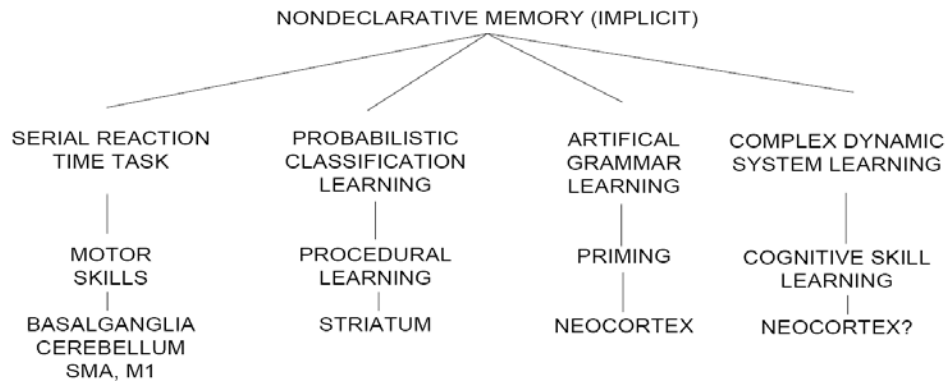


Abb. 2: Differenzierung des impliziten Lernens nach Witt et al. (2002a; 2002b).

Entlang der Zweige sind die Art der Lernaufgabe, die damit erlernte Fertigkeit und die zugehörige Region des Gehirns dargestellt (SMA = supplementär motorische Area, M1 = primär motorisches Areal).

1.1 Motorisches Lernen

Das nichtdeklarative Gedächtnis lässt sich in mehrere Kategorien unterteilen (Witt, Nuhsman et al. 2002a; 2002b). Besonders von Interesse ist hier das prozedurale Gedächtnis, das Gedächtnis für Fähigkeiten, Gewohnheiten und Verhaltensweisen.

1.1.1 Motorisches Lernen – prozedural und implizit

Motorisches Lernen wird als prozedurales oder implizites Lernen klassifiziert (Squire und Zola 1996). Implizit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Lernprozess dem Lernenden in der Regel unbewusst bleibt und er die gelernte Fertigkeit nicht verbalisieren kann. Hierin unterscheidet es sich vom deklarativen oder expliziten Lernen. Letzteres ist primär auf den Erwerb von Wissensinhalten ausgerichtet und meist mit bewussten Erinnerungszuständen assoziiert, somit also auch klarer verbalisierbar. Die Steigerung der Fertigkeiten im Rahmen des motorischen Lernens ist sowohl abhängig von der Frequenz der Wiederholungen als auch vom Faktor Zeit, wie Korman et al. (2003) beschreiben.

Explizites – also absichtliches, bewusstes – Lernen kann durch Schlaf konsolidiert werden. Dies zeigt sich z. B. beim Lernen von Wortpaarassoziationen (Marshall, Helgadottir et al. 2006; Rasch, Buchel et al. 2007). Dieser Konsolidierungsprozess korreliert mit der Dauer und Stärke des Slow-wave-Schlafes (Backhaus, Born et al. 2007; Marshall, Helgadottir et al. 2006). Motorische Fertigkeiten können auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten gelernt werden: Beim impliziten motorischen Lernen – implizit bezeichnet in diesem Fall das unbeabsichtigte, also unbewusste Lernen einer motorischen Bewegung – erfolgt eine Konsolidierung während der Wach- und auch während der Schlafphase eines Menschen (Robertson, Pascual-Leone et al. 2004a; 2004b); die Performance der motorischen Leistung verbessert sich also über Tag und über Nacht. Beim bewussten Lernen von Finger-

bewegungen – hier liegt der Untersuchungsschwerpunkt der vorliegenden Studie – kann eine Performancesteigerung nur schlafgebunden erfolgen (Robertson, Pascual-Leone et al. 2004a; Walker, Brakefield et al. 2002). Letzterer Lernprozess ist zwar prozedural, aber nicht implizit, da die gelernte Information klar verbalisiert werden kann.

1.1.2 Motorisches Lernen – neuronale Grundlagen

Verschiedene neuronale Strukturen sind für die verschiedenen Gedächtnissysteme notwendig (Squire und Zola 1996). Während das deklarative Gedächtnis vorwiegend im Temporallappen mit dem temporalen Neokortex und Hippocampus lokalisiert ist, sind im Falle der verschiedenen Formen des nichtdeklarativen Gedächtnisses unterschiedliche Hirnbereiche zuständig (siehe Abb. 2). Hier scheinen vor allem das Kleinhirn für die klassische Konditionierung und das Striatum für das prozedurale Lernen wichtig (Witt, Nuhsman et al. 2002a; 2002b; Witt, Daniels et al. 2006). Emotionale Reaktionen dagegen werden über die Amygdala verarbeitet. Auch der frontoparietale Kortex und die mit ihm verbundenen Regionen in den Basalganglien und dem Cerebellum sind am Lernen von motorischen Fertigkeiten beteiligt. Hikosaka et al. (2002) beschreiben zwei Verknüpfungen des primär motorischen Kortex (M1) im Gehirn, einmal mit den Basalganglien und zum anderen mit dem Cerebellum. Diese Verknüpfung und die beteiligten Strukturen werden in Abb. 3 gezeigt.

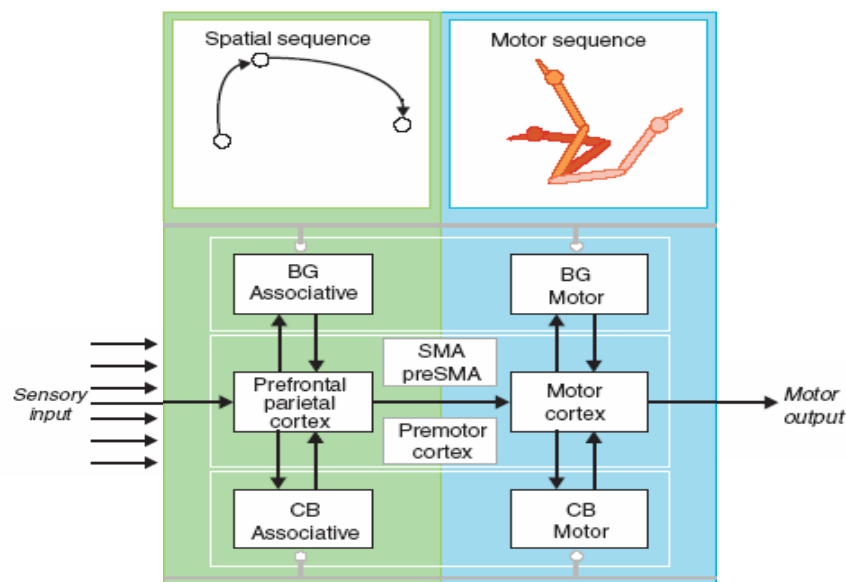


Abb. 3: Schema des Lernens motorischer Fertigkeiten.

Motorisches Lernen arbeitet mit der Interaktion zweier Verbindungen: intrakortikale Verbindungen (horizontale Pfeile) und Kortex-Basalganglien (BG) bzw. Kortex-Cerebellum (CB) Verschaltungen (vertikale Pfeile). Als zentrales Element stehen supplementär motorische Area (SMA) und prä-motorischer Kortex mit allen anderen Strukturen in Verbindung. Eine Bewegungssequenz ist auf zwei Wegen im Gehirn repräsentiert: räumlich und motorisch. Die linke Seite der Figur charakterisiert die Verarbeitung der räumlichen Sequenz, die rechte Seite die der motorischen Bewegungsabfolge (Hikosaka, Nakamura et al. 2002).

Funktionelle bildgebende Studien zum impliziten motorischen Lernen konnten diese Aufteilung in zwei Kreisläufe unterstützen; die identifizierten beteiligten Strukturen sind sehr ähnlich. Die erste motorische Verschaltung schließt zusätzlich zum M1 den lateralen prämotorischen Kortex und die supplementär motorische Area (SMA) der linken Hemisphäre ein (Halsband und Lange 2006). Der zweite Kreislauf, eine kognitive Schleife, besteht aus den Strukturen der Basalganglien. Außerdem scheint die präsupplementär motorische Area (präSMA), ein Areal direkt anterior der SMA, entscheidend für das Lernen einer neuen motorischen Fertigkeit zu sein.

Im Rahmen dieser Lernprozesse beschreibt der Begriff Plastizität die zu einer Anpassung an die Erfordernisse der äußeren Welt führende Veränderbarkeit der anatomischen und funktionellen Organisation des zentralen Nervensystems (Fahle 2005). Auf molekularer Ebene sind diese Veränderungen an den Synapsen und die Bildung von neuronalen Verbindungen verantwortlich für das Phänomen des Lernens (Nägerl, Eberhorn et al. 2004). Erinnerungswürdige Ereignisse werden zunächst in Form von Veränderungen der elektrischen Aktivität im Gehirn repräsentiert, dann als Veränderung in der Aktivität von Second-Messenger-Molekülen und schließlich durch Modifikation vorhandener Synapsenproteine. Diese vorübergehenden Veränderungen werden durch Strukturveränderungen der Synapsen in permanente Strukturen umgewandelt – in das Langzeitgedächtnis.

Interessant ist, dass Störungen des primären Motorkortex, welche durch eine TMS verursacht werden, das tagsüber stattfindende off-line Lernen blockieren, nicht aber die Konsolidierung über Nacht (Muellbacher, Ziemann et al. 2002; Robertson, Press et al. 2005). Dies zeigt die essenzielle Beteiligung des primären Motorkortex an der am Tag erfolgenden Konsolidierung. Darüber hinaus deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass der M1 im Schlaf keine führende Rolle bei der Steigerung der motorischen Fertigkeit einnimmt.

1.2 Schlaf und seine Bedeutung für das motorische Lernen

Konsolidierung eines Gedächtnisinhaltes bedeutet Bearbeitung des Gelernten und Festigung desselben. Dieser vielschichtige Prozess führt zu einer tieferen und reliableren Verankerung von Informationen im Gehirn (McGaugh 2000). Das Processing eines Lerninhaltes im Schlaf ist eine wichtige Komponente zur Formung unseres Gedächtnisses (Stickgold 2005). Es existieren mehrere Wege, in welcher Art und Weise Schlaf in die Ausbildung des Gedächtnisses involviert ist. Im Folgenden werden die drei wichtigsten Mechanismen näher erläutert: Steigerung der Performance einer motorischen Aufgabe, Stabilisierung eines Gedächtnisinhaltes und Generalisierung einer motorischen Fertigkeit.

1.2.1 Schlafgebundene Performancesteigerung der motorischen Fertigkeit

Praktizieren einer motorischen Fertigkeit induziert einen Prozess der Gedächtniskonsolidierung, welcher noch für Stunden nach dem eigentlichen Training anhält, selbst wenn die Übung längst beendet ist. Bei einer späteren Testung wird dieser in einer verbesserten Fertigkeit manifest (Fischer, Hallschmid et al. 2002; Korman, Raz et al. 2003). Die Bearbeitung des Gelernten, ohne dass die Bewegung selbst wieder ausgeführt wird, nennt man off-line Konsolidierung. Der Zusammenhang der off-line Konsolidierung mit Schlaf ist in verschiedenen Studien untersucht worden (u.a. Stickgold, James et al. 2000; Stickgold und Walker 2005).

Anhand eines Beispiels von Walker et al. (2002) wird die off-line Konsolidierung näher dargestellt. Mithilfe des sequenziellen Finger-Tapping-Tasks, welcher auch in der vorliegenden Studie genutzt wird, lernten die Probanden eine motorische Sequenz, also eine alternierende Fingerbewegung in vorgeschriebener Reihenfolge (siehe Abb. 4a). Die Sequenz beginnt mit dem Drücken des Zeigefingers (diesem wird die Ziffer „4“ zugeordnet), gefolgt von dem kleinen Finger (Ziffer „1“), dem Mittelfinger (Ziffer „3“), dem Ringfinger (Ziffer „2“) und wieder dem Zeigefinger. Innerhalb von 30 Sekunden soll diese Abfolge so oft wie möglich wiederholt werden. Diese 30 Sekunden-Intervalle, in denen getippt wird, wechseln mit Pausen, die ebenfalls 30 Sekunden dauern. Die Konsolidierung wurde durch erneute Testung nach einer Nacht mit Schlaf geprüft. Abb. 4b zeigt die Lernkurve der Probanden in Bezug auf die Geschwindigkeit, das heißt die Zahl der richtigen Sequenzen pro 30 Sekunden (Walker, Brakefield et al. 2003b). Hier wird eine Steigerung der Geschwindigkeit um 20% nach dem Schlaf sichtbar, genauso wie eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit, also der Fehler-rate pro Sequenz. Im Gegensatz dazu konnten die Probanden in einem erneuten Abruf der Sequenz nach einem Intervall ohne Schlaf keine weitere Verbesserung erzielen. Die Studie zeigt, dass wiederholtes Lernen der Sequenz am Tage zwar zu einer Verbesserung führt, die entscheidende Steigerung in der Performance aber nur nach dem Schlaf erzielt werden kann und die motorische Fertigkeit somit konsolidiert wird.

Zusätzlich konnten Walker et al. (2002; 2003b) Hinweise auf eine Assoziation der Performancesteigerung mit dem Stadium II des Non-REM-Schlafs finden. Ein interessantes Ergebnis ist aus Fischer et al. (2002) zu entnehmen; dabei ist die deutliche Verbesserung der Geschwindigkeit und die Absenkung der Fehlerrate nach dem Schlaf unabhängig vom Zeitpunkt der Schlafphase. Der Konsolidierungseffekt ist ebenfalls nach einer weiteren Nacht stabil, jedoch sehr spezifisch, da nur die gelernte motorische Sequenz konsolidiert wird, nicht aber eine ähnliche.

Abb. 4a

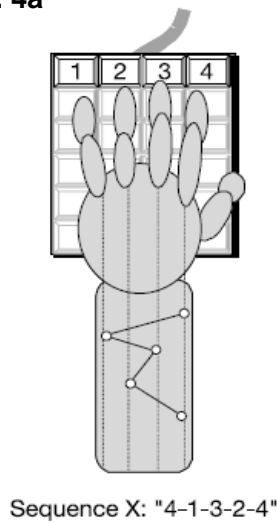


Abb. 4b

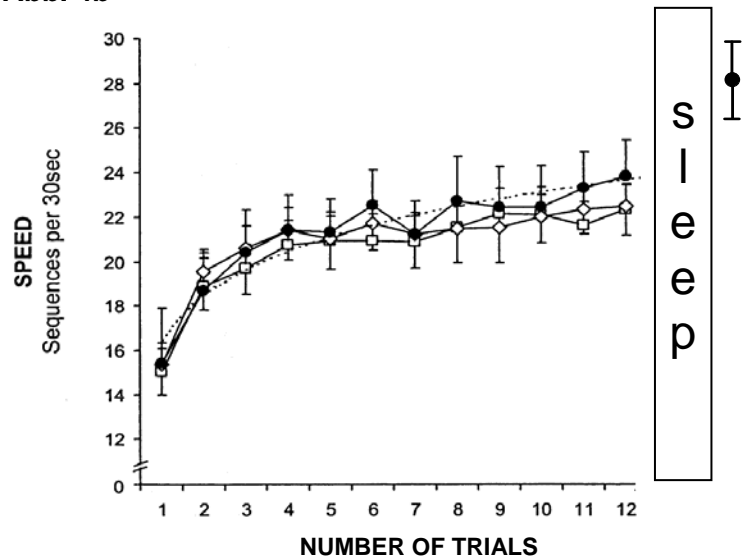


Abb. 4: Steigerung der Performance einer motorischen Fertigkeit.

Abb. 4a zeigt den Aufbau des Finger-Tapping-Tasks. Die Sequenz beginnt mit dem Drücken des Zeigefingers, gefolgt von dem kleinen Finger, dem Mittelfinger, dem Ringfinger und wieder dem Zeigefinger (Walker, Brakefield et al. 2003b). Innerhalb von 30 Sekunden soll diese Abfolge so oft wie möglich wiederholt werden. Diese 30 Sekunden-Intervalle, in denen getippt wird, wechseln mit Pausen, die ebenfalls 30 Sekunden dauern. Abb. 4b zeigt die Lernkurve der Probanden in Bezug auf die Geschwindigkeit, d. h. die Zahl der richtigen Sequenzen pro 30 Sekunden. In der Lernphase sind in dieser Abbildung die Lernkurven von vier Gruppen dargestellt, welche zu unterschiedlichen Tageszeiten übten. Die Gruppe, welche nach dem Schlaf erneut untersucht wurde, zeigt eine deutliche Performancesteigerung (Walker, Brakefield et al. 2003b).

Den Bezug zum Schlaf konnten Fischer et al. (2005) in einer funktionellen Magnet-Resonanztomographie-(fMRT)-Studie nachweisen. Schlafabhängige Konsolidierung steigert die Performance eines Tasks; im fMRT zeigt sich dabei eine Korrelation der schlafabhängigen Steigerung mit einer reduzierten Hirnaktivität im präfrontalen, prämotorischen und primären motorischen Kortex sowie einer größeren Einbeziehung der linken kortikalen parietalen Region. Im Schlaf findet also eine Reorganisation der erlernten motorischen Fertigkeit statt, die zum einen mit einer Performancesteigerung einhergeht und zum anderen zu einer Änderung der kortikalen Repräsentation führt. Somit ist unbestritten, dass Schlaf nach dem Training motorischer Fertigkeiten eine wichtige Rolle für die Konsolidierung spielt (Mednick, Nakayama et al. 2002). Die Mechanismen dieser Konsolidierung sind hingegen nicht geklärt.

1.2.2 Stabilisierung eines Gedächtnispfades

Die genannte Konsolidierung kann allerdings unterbrochen werden, z. B. durch Lernen eines zweiten motorischen Tasks direkt nach dem ersten (Brashers-Krug, Shadmehr et al. 1996). In solch einem Fall zeigt sich eine Interferenz beider motorischer Lerninhalte, sodass der zuerst Gelernte nicht konsolidiert werden kann (Walker, Brakefield et al. 2003a). Diese Konkurrenz wurde ebenfalls von Criscimagna-Hemminger und Shadmehr (2008) dokumentiert: Eine zweite motorische Fertigkeit „stört“ die Konsolidierung nach dem Erlernen einer ersten Bewegung. Die zuerst gelernte Fertigkeit erreicht erst nach Minuten oder gar Stunden eine gewisse Festigkeit.

Dieser, der Interferenz entgegenwirkende Teilprozess der Konsolidierung ist die Stabilisierung. Dabei wird ein fragiler Gedächtnisinhalt im Lauf der Zeit zunehmend resistent gegenüber Interferenzen, welche durch konkurrierende oder unterbrechende Faktoren entstehen. Walker et al. (2003a) konnten zeigen, dass eine schon gelernte, kaum für Interferenz anfällige motorische Fertigkeit nach ihrer Reaktivierung wieder fragil und damit abermals empfindlich für Interferenz wird. Es muss also eine Rekonsolidierung stattfinden. Somit bietet Zeit alleine keinen absoluten Schutz vor Interferenz (Goedert und Willingham 2002).

Faktoren, wie Schlafen oder Wachsein, greifen entscheidend in die Form der prozeduralen Konsolidierung ein: Dies trägt nicht nur zur Stabilisierung von Gedächtnisinhalten bei, sondern auch zur Verbesserung von Fertigkeiten (Robertson, Pascual-Leone et al. 2004b). Die Rolle des Schlafes im Prozess der Stabilisierung beschreiben Diekelmann et al. (2007) und Korman et al. (2007). Schon durch wenige Stunden Wachsein entsteht eine Resistenz gegenüber Interferenz. Eine schnellere Stabilisierung und sogar Steigerung der motorischen Fertigkeit dagegen kann nur durch Schlaf erfolgen (siehe Abb. 5).

In der oberen Zeile der Abb. 5 ist der unter 1.2.1 beschriebene Effekt des Schlafes auf die Performance des Finger-Tapping-Tasks mit einer Verbesserung derselben nach dem Schlaf abgebildet. Das off-line Intervall ohne Schlaf führt zu keiner Verbesserung der Performance, wohl aber das Intervall mit Schlaf. In der Mitte der Abbildung ist die Interferenz zweier gelernter Sequenzen dargestellt – hier als Sequenz A und B bezeichnet. Interferieren zwei Lern-Sequenzen an einem Tag kurz hintereinander, so kann die erste motorische Aufgabe in der folgenden Nacht nicht konsolidiert werden. Letztendlich zeigt die untere Zeile die Aufhebung der Interferenz durch kurzen Schlaf. Ein zuvor fragiler motorischer Gedächtnispfad wird stabilisiert, sodass diese Fertigkeit in einem zweiten Schritt im Nachtschlaf auch hinsichtlich der Performance verbessert werden kann.

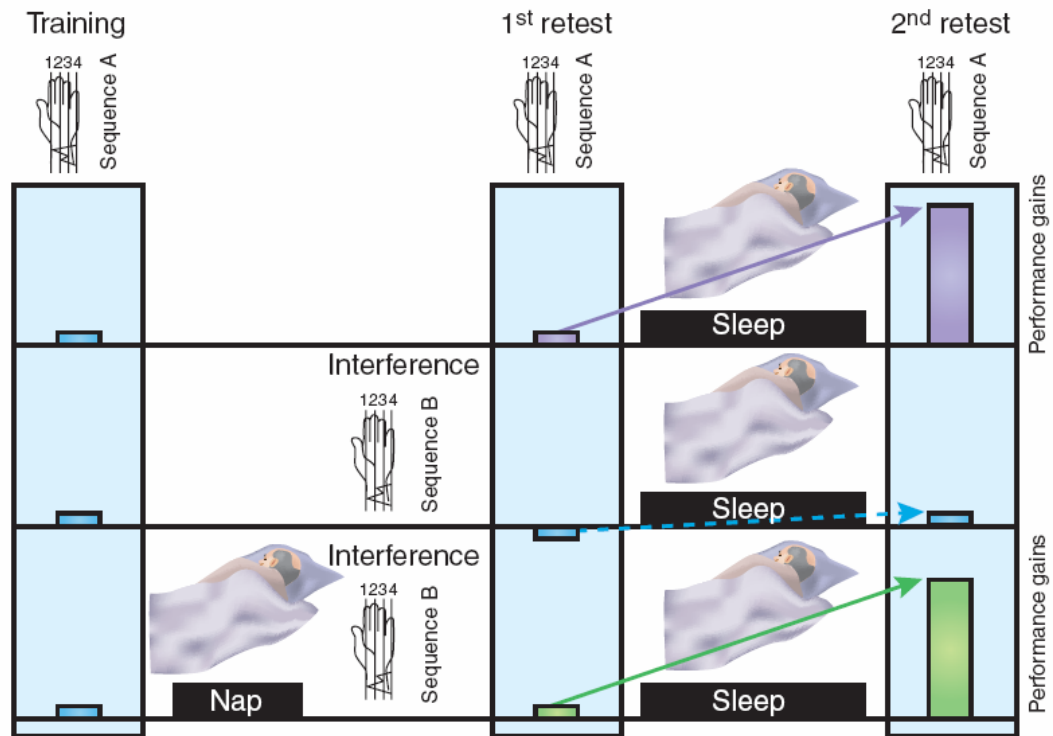


Abb. 5: Zwei Wege der Konsolidierung einer motorischen Fertigkeit.

Obere Zeile: Verbesserung der Performance des Finger-Tapping-Tasks nach dem Schlaf. Mitte: Interferenz zweier gelernter Sequenzen – Sequenz A und B. Die erste motorische Aufgabe (A) kann in der folgenden Nacht nicht konsolidiert werden. Untere Zeile: Ein kurzer Schlaf (Nap) hebt diese Interferenz auf; Stabilisierung eines zuvor fragilen motorischen Gedächtnispfades. Diese kann in einem zweiten Schritt im Nachtschlaf auch hinsichtlich der Performance verbessert werden (Diekelmann und Born 2007; Korman, Doyon et al. 2007).

1.2.3 Generalisierung einer motorischen Fertigkeit

Ein weiterer Teilprozess der Konsolidierung ist die Generalisierung. Diese beschreibt die Fähigkeit in einem bestimmten Kontext Gelerntes auf einen anderen Zusammenhang zu transferieren (Krakauer, Mazzoni et al. 2006). Wurde z. B. erst einmal gelernt, ein Telefon mit der einen Hand zu bedienen, wird die gleiche Tätigkeit auch mit der gegenseitigen Hand leichter auszuführen sein. Die Umstellung der nur mit einer Extremität gelernten motorischen Fertigkeiten erfordert die Fähigkeit zur schnellen Modifikation (Birbaumer 2007).

Das Lernen einer neuen Fingerbewegung führt bei den meisten Menschen zu Performancesteigerungen bei Testung der anderen Hand. Die Prozesse, welche zur Gewährleistung des Transfers im Gehirn ablaufen, sind bis jetzt noch nicht vollständig verstanden. Perez et al. (2007) konnten eine Korrelation der Aktivität der SMA mit der Höhe des Transfers zeigen.

Durch die Blockierung der SMA mithilfe der TMS zeigt sich ein fehlender Transfer, jedoch keine Beeinflussung der Performancesteigerung der originalen Hand, welche ursprünglich lernte. Auch die ipsilaterale Hemisphäre könnte an dem Ausmaß des intermanualen Transfers beteiligt sein (Chase und Seidler 2008).

Generalisierung bedeutet also Übertragung des Gelernten. Vielfältige Studien untersuchen diesen Prozess der Konsolidierung mithilfe der Übertragung einer gelernten motorischen Sequenz bzw. Fingerbewegung auf die gegenseitige Hand (Cohen, Pascual-Leone et al. 2005; Grafton, Hazeltine et al. 1998; Grafton, Hazeltine et al. 2002; van Mier und Petersen 2006; Vangheluwe, Suy et al. 2006; Verwey und Wright 2004; Verwey und Clegg 2005). Dies kann auf zwei verschiedenen Wegen geschehen und soll hier am Beispiel des auch für die vorliegende Arbeit verwendeten sequenziellen Finger-Tapping-Tasks erläutert werden. Der Task selbst wird in den Abschnitten 1.3.2 und 2.3 näher beschrieben.

Wie in Abb. 6 schematisch dargestellt, lernt der Proband eine motorische Fingerbewegung mit der linken Hand. Die obere Zeile der Abbildung zeigt eine der Möglichkeiten der Übertragung des Gelernten. Der Proband tippt die gleiche Sequenz, welche er zuvor mit der linken Hand gelernt hat, im Abruf mit der rechten Hand. Dabei bleibt die Reihenfolge der Tastenanschläge dieselbe, aber der Proband nutzt andere Finger zur Ausübung der Bewegung. Diese Art der Transformation von sequenziellen Bewegungen wird in einem allozentrischen (objektbezogenen) Koordinatensystem übertragen. Dies nennt man „Effektor-unabhängige“ (auch „extrinsische“ oder „goal-based“) Übertragung der Fertigkeiten (Cohen, Pascual-Leone et al. 2005). Eine zweite Möglichkeit bietet das, in der unteren Zeile der Abbildung veranschaulichte, Tippen der räumlich gespiegelten Sequenz mit der gegenseitigen Hand. Hierbei bleibt die Reihenfolge der genutzten Finger, also die erlernte Fingerbewegung, dieselbe. Die gespiegelte Transformation findet in einem egozentrischen (körperbezogenen) Koordinatensystem statt, welches auf der Symmetrie der Muskeln und Gelenke beruht. Dies nennt man „Effektor-abhängige“ (auch „intrinsische“ oder „movement-based“) Übertragung der Fertigkeit (Cohen, Pascual-Leone et al. 2005).

Der Begriff „Effektor-abhängig“ ist in der Literatur etabliert (Verwey und Wright 2004; Verwey und Clegg 2005), aber irreführend, da er suggeriert, dass die Hand bei der Transferaufgabe nicht gewechselt wurde. Eindeutig sind die Begriffe der intrinsischen bzw. extrinsischen Übertragung; aus diesem Grund wird dieses Begriffspaar in der vorliegenden Arbeit verwendet.

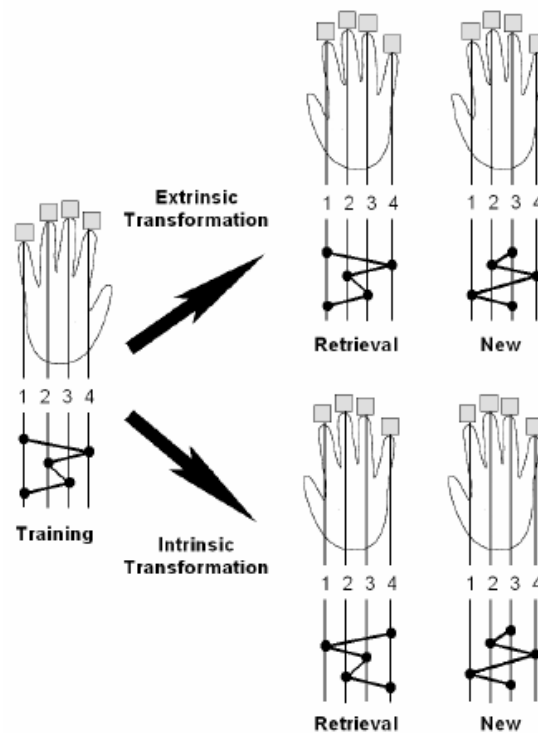


Abb. 6: Darstellung der Fingerbewegungen der Transferbedingungen.

Lernen einer Sequenz mit der linken Hand. Links ist das Training einer seriellen Tapping-Aufgabe dargestellt. Die extrinsische Transformation prüft den Transfer der gelernten Sequenz auf die rechte Hand, dabei bleibt die Sequenzstruktur erhalten, es müssen aber die Finger der rechten Hand spiegelbildlich bewegt werden. Die intrinsische Transformation reflektiert die Lern-Sequenz, sodass die Reihenfolge der Fingerbewegungen dieselbe bleibt. Rechts zeigt die Abbildung eine neue Sequenz, welche als Kontroll-Sequenz genutzt wird.

Die Transfer-Effekte hängen sowohl sehr stark von dem zur Messung verwendeten Lerntest ab (Bapi, Doya et al. 2000; Criscimagna-Hemminger und Shadmehr 2008; Grafton, Hazeltine et al. 2002; Krakauer, Mazzoni et al. 2006; Verwey und Wright 2004; Verwey und Clegg 2005; Willingham, Wells et al. 2000), als auch von der Richtung des Transfers – von der dominanten auf die nicht-dominante Hand oder umgekehrt (Criscimagna-Hemminger, Donchin et al. 2003; Halsband und Freund 1993).

Bisherige Studien konzentrierten sich auf die unmittelbaren Effekte des Transfers nach dem Training von Fertigkeiten, vernachlässigten aber den möglichen Beitrag der off-line Konsolidierung, mit Ausnahme der Studie von Cohen et al. (2005). Diese haben mithilfe des Serial-Reaction-Time-Task (SRTT, in Abschnitt 1.3.1 näher erläutert) gezeigt, dass die off-line Konsolidierung tagsüber (Wachheitszustand) die Reaktionszeiten für die intrinsische Transformation beschleunigt, wohingegen die Festigung während des Nachtschlafes die Performance der extrinsischen Bewegung fördert (Cohen, Pascual-Leone et al. 2005).

1.3 Verschiedene Tasks und deren Einsatz in Studien

Die gegenwärtigen Fortschritte in der Gedächtnisforschung sollten Forschende im Bereich des Schlafes nicht außer Acht lassen und Tasks verwenden, welche spezielle Gedächtnissysteme nutzen, um deren Beziehung zu den Schlafstadien zu untersuchen (Smith 2001). Zahlreiche Tasks prüfen verschiedene Aspekte des motorischen Lernens, z. B. visuell-motorische Trackingaufgaben oder motorisches Lernen in einem „force field“, welches veränderte Kräfte dynamisch als Reaktion auf die Bewegung ausführt und hier zu einer Adaptation der Bewegung zwingt (Criscimagna-Hemminger, Donchin et al. 2003; Criscimagna-Hemminger und Shadmehr 2008). Im Folgenden sind die zwei für die vorliegende Studie wichtigsten, in der aktuellen Wissenschaft vielfältig genutzten Tasks erläutert.

1.3.1 Serial-Reaction-Time-Task

Der Serial-Reaction-Time-Task (SRTT) wurde von Nissen und Bullemer (1987) vorgestellt und gewinnt seitdem zunehmend an Bedeutung.

In diesem Task erscheint, horizontal auf einem Computerbildschirm angeordnet, ein optischer Hinweis an einer von vier möglichen Positionen. Jede dieser Positionen, bezeichnet mit den Ziffern 1 bis 4, entspricht einer Taste auf der Tastatur. Der Proband wird angehalten, die dem Symbol auf dem Bildschirm entsprechende Taste so schnell wie möglich zu drücken (Robertson 2007). Somit entsteht durch wiederholte Abfolge dieses Vorgangs eine zufällige oder bestimmte (je nach Vorgabe des Untersuchers) Reihenfolge der getippten Ziffern. Dies hat den Vorteil, dass eine Reihe von zufälligen Nummernfolgen eine mehr oder weniger komplizierte Ordnung beinhalten kann, ohne dass sich der Proband dieser Sequenzen bewusst ist; er hat also die Möglichkeit diese implizit zu lernen. Zu berücksichtigen ist, dass nach langem Training diese Sequenz auch explizit gelernt werden kann.

Misst man nun die Reaktionszeit der Probanden über die verschiedenen Durchgänge hinweg, so ist der SRTT ein einfaches Instrument zur Messung von implizit erlerntem Sequenzverhalten. Aus diesem Grund findet das Lernen der motorischen Sequenz in diesem Task nicht ausschließlich durch Steuerung der motorischen Areale im Gehirn statt. Auch das perzeptuelle Lernen – die Probanden lernen die Erscheinungsposition des nächsten visuellen Hinweises zu antizipieren – ist eine Komponente, welche zum Task beiträgt (Pascual-Leone, Grafman et al. 1993).

1.3.2 Sequenzieller Finger-Tapping-Task

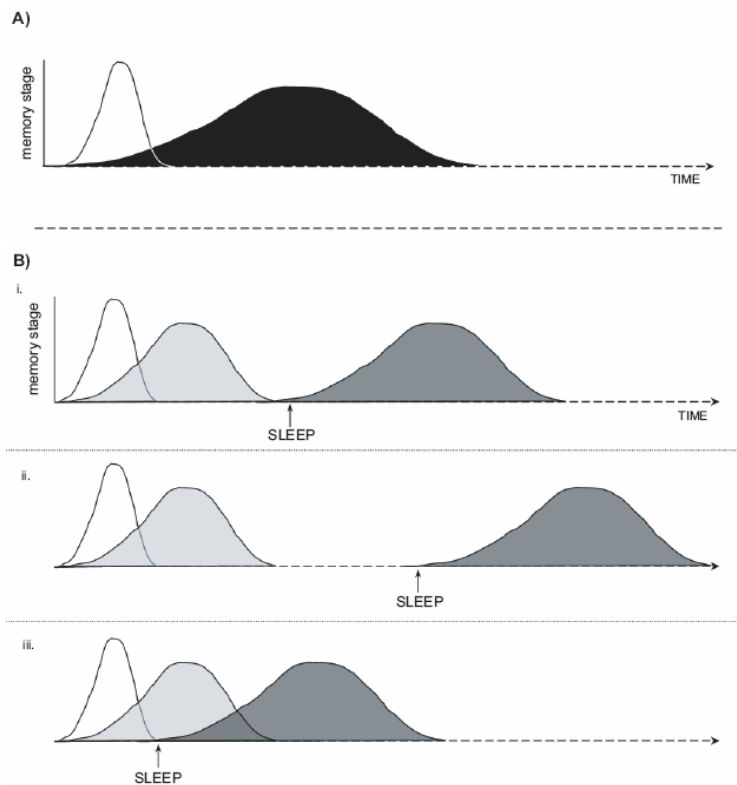
Der von Walker et al. (2002; 2003a; 2003b) etablierte sequenzielle Finger-Tapping-Task arbeitet mit einer fünfstelligen, numerischen Sequenz, welche durch den Probanden in jedem Trial so oft, aber auch so fehlerfrei wie möglich, wiederholt getippt werden soll (ein Trial setzt sich aus 30 Sekunden tippen und 30 Sekunden Pause zusammen, siehe auch 2.3). In Anlehnung an Walker et al. (2003a) wird auch in der hier vorgestellten Studie die Sequenz der Ziffern „4-3-1-2-4“ und ihre Spiegelung genutzt.

Im Gegensatz zum SRTT prüft dieser Task das bewusste Lernen einer motorischen Fertigkeit, da dem Probanden die zu lernende Sequenz direkt vorgegeben wird und damit bekannt ist (Krakauer und Shadmehr 2006). Steigerungen in der Performance werden hier durch eine höhere Anzahl richtig getippter Sequenzen (pro 30 Sekunden) und verbesserte Genauigkeit (weniger Fehler pro Sequenz) gemessen.

1.4 Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit

Unumstritten ist, dass Schlaf zur Konsolidierung einer motorischen Fertigkeit in Form von Stabilisierung und Steigerung beiträgt. Walker et al. (2005) fassen einige Studien zusammen, welche die Konsolidierung eines prozeduralen Gedächtnisinhaltes nicht durch Zeit per se definieren, sondern sie stattdessen genauer durch die Zeit bestimmen, die in spezifischen Zuständen des Gehirns, wie Wachsein oder Schlafen (oder sogar in bestimmten Schlafstadien), verbracht wird (Brashers-Krug, Shadmehr et al. 1996; Fischer, Hallschmid et al. 2002; Muellbacher, Ziemann et al. 2002; Stickgold, James et al. 2000; Walker, Brakefield et al. 2002; 2003b). Abb. 7 veranschaulicht diese aktuelle Vorstellung durch Unterteilung des Prozesses, welcher nach dem Lernen der motorischen Fertigkeit stattfindet: Einerseits auf Konsolidierung basierende Stabilisierung – zeitabhängig, aber nicht schlafabhängig – andererseits eine ebenfalls auf Konsolidierung basierende Steigerung der motorischen Fertigkeit. Letzteres ist ein Prozess, der vom Status des Gehirns abhängig ist, genauer vom Schlaf; ungeachtet, ob dieser direkt nach dem Lernen oder einige Stunden später stattfindet. Dieser Aspekt, verbunden mit den Erkenntnissen von Cohen et al. (2005) – Steigerung der intrinsisch transformierten Sequenz durch Konsolidierung tagsüber und Steigerung der extrinsisch basierten Fertigkeit durch Konsolidierung im Schlaf – bildet die Grundlage der vorliegenden Arbeit. Die Abbildung zeigt jedoch auch, dass die Generalisierung einer motorischen Fertigkeit, da sie bislang kaum untersucht wurde, nicht in die Modelle der Konsolidierung eingebunden ist. Was für den von Cohen et al. (2005) genutzten SRTT und für das Lernen einer motorischen Sequenz zutrifft, gilt nicht zwangsläufig für das Lernen einer motorischen Fertigkeit, welches typischerweise explizit stattfindet. Letzteres sollte vor-

zugsweise mit Tasks wie dem sequenziellen Finger-Tapping-Task geprüft werden (Krakauer und Shadmehr 2006). Solche Tasks zur Testung von expliziten motorischen Fertigkeiten stützen sich auf eindeutige neuronale Netzwerke und sind, verglichen mit dem impliziten SRTT, sensitiver für die Effekte des Schlafes auf die off-line Konsolidierung (Robertson, Pascual-Leone et al. 2004a; Walker, Brakefield et al. 2002; Walker, Brakefield et al. 2003b).



In der vorliegenden Studie werden mithilfe des sequenziellen Finger-Tapping-Tasks in Anlehnung an die oben erwähnten Studien von Walker et al. (2002; 2003a; 2003b) und die Einteilung der Konsolidierung in zwei Teilprozesse durch Cohen et al. (2005) folgende schlafassoziierte Mechanismen des motorischen Lernens beleuchtet:

- Ist die Generalisierung einer motorischen Fertigkeit als Teilaspekt der Konsolidierung für eine explizit erlernte motorische Fertigkeit nachweisbar?
- Ist das Konzept der Steigerung extrinsisch und/oder intrinsisch basierter Fertigkeiten im Rahmen dieser Konsolidierung nachweisbar?
- Wenn ja, wann ist der Zeitpunkt des stärksten Effekts (wach- oder schlafgebundene Konsolidierung)?
- Kann ein Zusammenhang zwischen einer Performancesteigerung und einem Schlafstadium gefunden werden?

2 Probanden, Material und Methoden

2.1 Probandenauswahl

An der vorliegenden Studie nahmen insgesamt 72 gesunde Rechtshänder (39 Frauen und 33 Männer) im Alter von 18 bis 28 Jahren (mittleres Alter: 23,1 Jahre) teil. Das Einschlusskriterium des Alters (> 18 und < 28 Jahre) wurde gewählt, da aus Vorstudien die Vermutung eines hohen Effekts des Alters auf das Konsolidieren motorischer Fertigkeiten abgeleitet werden kann. Menschen ab der 3. Dekade weisen dabei deutlich geringere Konsolidierungseffekte als jüngere Personen auf (Spencer, Gouw et al. 2007). Die rechte Hand wurde als dominante Hand gefordert, um eine einheitliche Probandengruppe zu untersuchen, welche nicht durch Effekte einer unterschiedlichen Händigkeit konfundiert ist. Definiert wurde die Händigkeit durch das Edinburgh Handedness Inventory nach Oldfield (siehe 2.6.1 und Anhang 8.2.4).

Die Ausschlusskriterien waren:

- (Berufs-)Musiker, Sekretärinnen
- Schichtarbeiter, deren letzte Nachtschicht weniger als vier Wochen zurücklag
- Personen mit regelmäßiger Medikamenteneinnahme (Ausnahme: orale Antikonzeptiva)
- Personen mit Substanzabhängigkeit, aktuell oder in der Vorgeschichte
- Personen mit neurologischen oder psychiatrischen Erkrankungen, aktuell oder in der Vorgeschichte
- Personen mit chronischen Schlafstörungen

Zur Dokumentation füllten alle Testpersonen vor Beginn der Testung einen Fragebogen zu diesen Ausschlusskriterien aus (siehe 2.6.2 und Anhang 8.2.5). Alle Probanden wurden über den Studieninhalt und den Ablauf mündlich und schriftlich aufgeklärt (jedoch nicht über den Transfer der motorischen Sequenz von der linken auf die rechte Hand) und erteilten ihr schriftliches Einverständnis (Einverständniserklärung siehe Anhang 8.1). Die Probanden der tagsüber konsolidierenden Gruppen (Gruppen 1 – 4) erhielten jeweils 25,00 Euro und diejenigen, denen mit der Konsolidierung über Nacht auch das Polysomnographie-Gerät angelegt wurde (Gruppen 5 und 6), erhielten jeweils 50,00 Euro Aufwandsentschädigung. Ein Rücktritt von der Studie war zu jedem Zeitpunkt möglich.

Vor Beginn der Studie lag eine Genehmigung der Ethik-Kommission der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel vor (AZ: A187/08).

Die Zuordnung der Probanden zu den einzelnen Gruppen erfolgte nach dem Urnenmodell. Durch die Verteilung der Teilnehmer auf sechs Gruppen á 12 Personen ergab sich eine zum Studienende balancierte Randomisierung. In jeder Gruppe wurden gleich viele Probanden getestet und dabei darauf geachtet, dass in jede Gruppe weibliche und männliche Probanden integriert waren. Diese gleichmäßige Geschlechterverteilung sollte eventuell vorhandene geschlechtsspezifische Einflüsse auf die Ergebnisse ausschließen. Tabelle 1 zeigt die Verteilung der Probanden im Hinblick auf Geschlecht und mittleres Alter.

Tabelle 1: Verteilung der Probanden

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6
Probandenzahl	n=12	n=12	n=12	n=12	n=12	n=12
Männer	6	6	6	6	4	5
Frauen	6	6	6	6	8	7
Mittleres Alter (Jahre)	25,5	20,9	23,3	21,3	22,4	23,7

2.2 Studiendesign

Nach Zuordnung zu einer der sechs Gruppen erfolgte die Testung der Probanden. Für die Studie wurde ein Laptop (Dell Latitude, D 620 aus dem Jahr 2007) mit extern angeschlossener Tastatur genutzt. Bei dieser wurden alle Tasten entfernt, außer den für die Testung notwendigen vier Tasten mit den Zahlen 1 – 4. Diese waren parallel auf der Tastatur angeordnet und entsprachen der Größe von PC-Tastaturtasten. Zusätzlich zur Beschriftung der Tasten selbst wurden, zur besseren Übersicht, die entsprechenden Zahlen direkt oberhalb der jeweiligen Taste angebracht. Die Testung erfolgte für alle Probanden unter gleichen Bedingungen: In einem ruhigen Raum, an einem Schreibtisch, mit ausreichender Arm- und Beinfreiheit sowie bequemer Sitzmöglichkeit.

Eine Übersicht über das im Folgenden beschriebene Studiendesign zeigt Abb. 8. Zunächst absolvierten alle Testpersonen eine Lernphase. Dabei tippte jeder Proband mit der linken Hand eine der vier Sequenzen des sequenziellen Finger-Tapping-Tasks (siehe 2.3). Jeweils für die Dauer von 30 Sekunden sollte die Sequenz so oft, aber auch so fehlerfrei wie möglich angeschlagen werden. Daraufhin erhielt der Proband 30 Sekunden Pause, bevor die nächste Phase des Tippens folgte. Auf diese Weise wurde eine bestimmte Fingerbewegung (entsprechend der gelernten Sequenz bzw. Tastenreihenfolge) eingeübt. Dieser Lernvorgang erstreckte sich über insgesamt 15 Minuten (entspricht 15 Trials á 30 Sekunden Tippen und 30 Sekunden Pause).

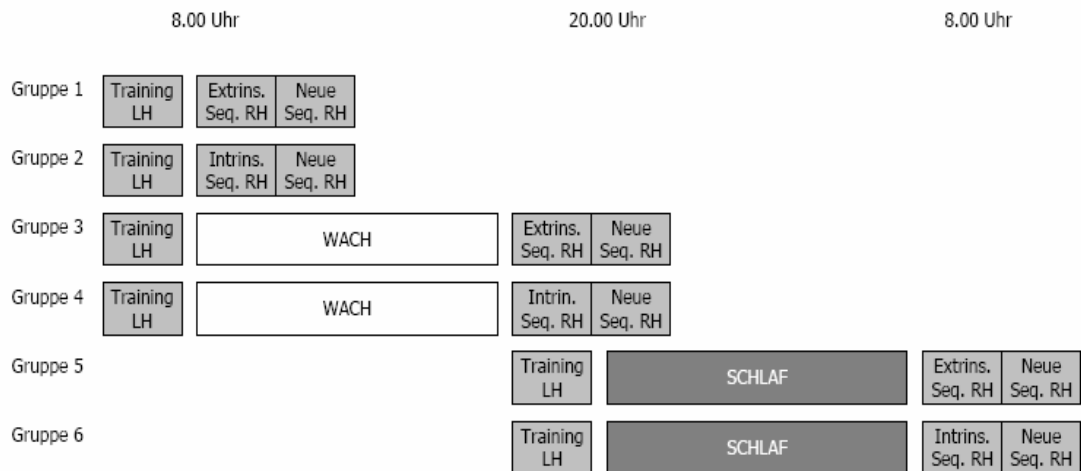


Abb. 8: Übersicht über das Studiendesign.

LH = linke Hand, RH = rechte Hand, Extrins. = extrinsisch, Intrins. = intrinsisch, Seq. = Sequenz. Gruppe 1 und 2 führten somit gleich nach dem Lernen den Abruf mit der rechten Hand aus, während bei den Gruppen 3 bis 6 ein Intervall von 12 Stunden zwischen Lernen und Abruf lag, welches eine Wachphase (Gruppe 3 und 4) oder eine Schlafphase (Gruppe 5 und 6) beinhaltete.

Die Phase des Abrufs des Gelernten erfolgte *mit der rechten Hand*, folglich mit der gegenseitigen Hand, die in der Lernbedingung benutzt wurde. Der Proband tippte in jeweils vier Durchgängen (vier Trials á 30 Sekunden Tippen und 30 Sekunden Pause) zwei verschiedene Sequenzen – die dem Probanden aus der Lernphase bekannte und eine ihm unbekannte neue Sequenz. Zur Vermeidung eventueller Interferenzen wurde zunächst die für diese Studie interessante Sequenz, die Transfer-Sequenz, getippt (siehe auch 1.2.3). Hierbei sollte die Testperson je nach Gruppenzuteilung entweder die Gespiegelte der gelernten Sequenz (intrinsische Transformation, siehe auch 1.2.3) oder die gleiche Sequenz (extrinsische Transformation, siehe auch 1.2.3) über die Dauer von vier Trials anschlagen. Zum Vergleich der Performance und zur Einordnung der Ergebnisse folgten danach vier Trials einer neuen, dem Probanden zuvor unbekannten Sequenz. Um eine Ermüdung der Testperson zu vermeiden, erhielt diese zwischen den einzelnen Testungen ausreichend Regenerationszeit, jeweils ca. fünf bis zehn Minuten.

In den Gruppen 1 und 2 erfolgte die Lernphase um 8.00 Uhr morgens. Der Abruf fand unter Berücksichtigung der erwähnten Pause unmittelbar danach statt. Somit sind diese beiden Gruppen geeignet, das Ausmaß des Transfers – also die Generalisierung einer motorischen Fertigkeit – während bzw. unmittelbar nach der Lernphase zu beurteilen. Dies gilt für die extrinsische (Gruppe 1) und für die intrinsische (Gruppe 2) Transformation (siehe Abb. 8). Ebenso lernten die Gruppen 3 und 4 morgens um 8.00 Uhr den Finger-Tapping-Task, der Abruf fand jedoch erst nach 12 Stunden, um 20.00 Uhr, statt. Somit ist es möglich, das

Ausmaß des Transfers nach einem Tagesintervall ohne Schlaf zu beurteilen (wiederum für die extrinsische (Gruppe 3) und die intrinsische (Gruppe 4) Transformation). Die Besonderheit der Gruppen 5 und 6 lag darin, dass die Lernphase um 20.00 Uhr stattfand und der Abruf erst nach 12 Stunden inklusive einer Nacht mit Schlaf, also um 8.00 Uhr des folgenden Tages, stattfand. Mithilfe dieser Gruppen kann für die extrinsische (Gruppe 5) und intrinsische (Gruppe 6) Transformation die schlafgebundene Generalisierung einer motorischen Fertigkeit gemessen werden. Um das Schlafprofil zu dokumentieren und eventuelle Korrelationen von Schlafstadien und Performance-Steigerungen zu detektieren, wurde in diesen beiden Gruppen zusätzlich das Schlafprofil mithilfe eines Polysomnographie-Gerätes aufgezeichnet. Zur Vermeidung von Störungen beim Tippen der Sequenzen durch das ungewohnte Tragen dieses Gerätes wurde das System während der Testung nicht getragen.

Die Probanden durften 12 Stunden vor der Testung und bis zum Abschluss der Testphase keinen Alkohol und kein Koffein zu sich nehmen. Zudem wurden die Teilnehmer angewiesen, am Tag der Testung keinen Mittagsschlaf zu halten bzw. nicht nach 23.00 Uhr schlafen zu gehen und nicht vor 6.00 Uhr aufzustehen. Die Schlafqualität wurde durch den Pittsburgh-Schlafqualitätsindex (siehe 2.5.3 und 8.2.3) objektiviert, der Wachheitsgrad des Probanden zum Zeitpunkt der Lernphase und des Abrufs jeweils durch die Stanford Sleepiness Scale (siehe 2.5.1 und Anhang 8.2.1) und eine Eigenschaftswörterliste (siehe 2.5.2 und Anhang 8.2.2) bestimmt. Außerdem erhielten alle Probanden den Hinweis, die gelernte Sequenz in der Phase zwischen Lernen und Abruf keinesfalls zu üben. Keine Information erfolgte über die Tatsache des Transfertests beim Abruf, um ein mögliches Üben mit der rechten Hand zu verhindern.

2.3 Sequenzieller Finger-Tapping-Task

In Anlehnung an Walker et al. (2002) arbeitet der sequenzielle Finger-Tapping-Task mit einer fünfstelligen numerischen Sequenz, welche in Trials von 30 Sekunden Tippen und darauffolgenden 30 Sekunden Pause gelernt bzw. abgerufen wird (siehe auch 1.3.2). In der Phase des Tippens wird die Testperson aufgefordert die Tastenreihenfolge jeweils so schnell, aber auch so fehlerfrei wie möglich anzuschlagen. Dabei erlernt der Proband explizit eine Fingerbewegung, welche später über eine erneute Testung (Abruf) in ihrer Performance überprüft werden kann. Zu diesem Zweck werden die Geschwindigkeit und die Genauigkeit als Maßstäbe herangezogen. Die Geschwindigkeit wird definiert als die Anzahl der korrekt getippten Sequenzen pro 30 Sekunden. Die Genauigkeit wird als das Verhältnis der Fehler zu der Zahl der richtig getippten Sequenzen pro 30 Sekunden determiniert.

Hieraus ergibt sich:

$$\text{Fehler pro Sequenz} = \frac{\text{Zahl der Tastenanschläge} - 5 \times \text{Zahl der korrekten Sequenzen}}{\text{Zahl der korrekten Sequenzen}}$$

Dem Probanden wird die zu tippende Sequenz bzw. das Wort „Pause“ auf einem Computerbildschirm angezeigt. Die Testperson schlägt dann in der Phase des Tippens die angegebenen Tasten auf der externen Tastatur an. Hierbei übernimmt das Programm die Zählung der zu tippenden Trials (Lernphase: 15 Trials, Abruf: jeweils vier Trials). Zur Auswertung zählt das Programm die richtig getippten Sequenzen pro 30 Sekunden (Geschwindigkeit) und zeichnet die vom Probanden getippten Tastenanschläge auf. Somit ist eine manuelle Fehlerauswertung ebenfalls möglich.

Verwendet werden insgesamt vier verschiedene Sequenzen (I-IV): zwei Versionen (V1 und V2) und ihre jeweilige Spiegelung (M = mirror).

Konkret bedeutet dies:

- Sequenz I (V1): 2-3-1-4-2
- Sequenz II (V1M): 3-2-4-1-3
- Sequenz III (V2): 4-1-3-2-4
- Sequenz IV (V2M): 1-4-2-3-1

Wobei „1“ die Taste, welche mit dem kleinen Finger gedrückt wird und „4“ die Taste des Zeigefingers der linken Hand repräsentiert; dazwischen bedient der Ringfinger die Taste „2“ und der Mittelfinger die Taste „3“ (siehe auch Abb. 4a in Abschnitt 1.2.1 und Abb. 6 in Abschnitt 1.2.3).

Die numerische Sequenz wird dem Probanden während der gesamten Testphase angezeigt, um die Arbeitsgedächtnis-Komponente des Tasks zu minimieren. Als Folge jeder Taste, die gedrückt wird, erscheint unabhängig von der Richtigkeit der Antwort das Symbol „>“ auf dem Bildschirm; um zu signalisieren, dass der Proband eine Taste gedrückt hat, aber dem Probanden kein Feedback über die Genauigkeit der Antwort zu geben.

Durch den Wechsel der Hände (Lernen mit der linken Hand und Abruf mit der rechten Hand) werden die Transfer-Sequenzen definiert. Dabei entsteht im Abruf durch Tippen der gleichen, mit links gelernten Sequenz, die extrinsisch-basierte Variante und durch Tippen der gespiegelten Sequenz, im Vergleich zu der Gelernten, die intrinsisch-basierte Version. Als Kontrolle und zur Messung der Performanceänderungen dient das Tippen einer neuen, dem Probanden völlig unbekannten Sequenz mit der rechten Hand. Diese Kontroll-Sequenz stellt

dementsprechend die Version der oben genannten Sequenzen, welche der Proband weder als Original-Version oder als gespiegelte Sequenz kennengelernt hat, dar; also im Falle, dass der Proband V1 tippte und V1M als Transferbedingung, erhielt er V2 oder V2M als Kontroll-Sequenz (zur Zuordnung der Versionen zu den einzelnen Probanden siehe Anhang 8.3).

2.4 Polysomnographie

Mithilfe von Polysomnographie-Geräten (SOMNOscreen, SOMNOmedics, Miami, USA) wurde das Schlafprofil der Probanden aus den Gruppen 5 und 6 (deren Testung eine Nacht inklusive Schlaf beinhaltete) aufgezeichnet. Dies umfasst die gleichzeitige, kontinuierliche Registrierung verschiedener Parameter zur Beurteilung des Schlafs in der Nacht der Testung. Genutzt wurde die klassische Ableitung nach dem Manual von Rechtschaffen und Kales (1968). Diese platzieren die Elektroden für das Elektroenzephalogramm (EEG; wie in Abb. 9 gezeigt).

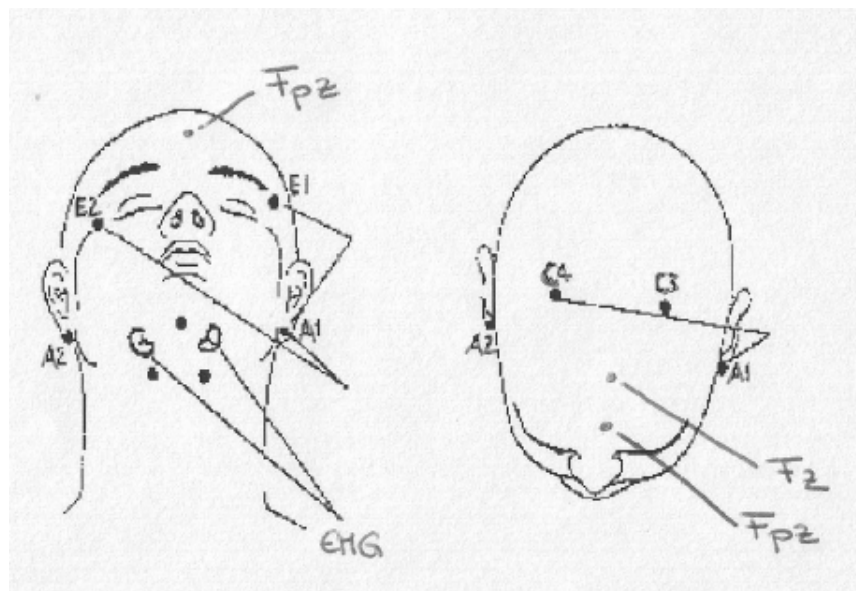


Abb. 9: Elektrodenpositionierung für die PSG nach Rechtschaffen und Kales (1968).

Linke Abb.: A1 = Mastoid links, A2 = Mastoid rechts, E1 = Orbita links oben, E2 = Orbita rechts unten, Fpz = Stirnpol, EMG = Positionierung der Elektroden für das EMG. Rechte Abb.: A1 = Mastoid links, A2 = Mastoid rechts, C3 = zentral oben links, C4 = zentral oben rechts, Fz = Frontalpol

Dazu kamen Elektroden, ebenfalls in Abb. 9 dargestellt, für das Elektrookulogramm (EOG, Orbita links oben (E1) und rechts unten (E2)) als weitere Hilfe zur Einteilung des REM-Schlafes, das Elektromyogramm (EMG, M. mentalis links und rechts) zur Erfassung der Muskelaktivität bzw. des Muskeltonus und das Elektrokardiogramm (EKG mit Ableitung 2. Intercostalraum rechts und unter der Brust links) zur Detektion möglicher EKG-Artefakte im

EEG und EOG. Zusätzlich wurden die Lageveränderungen der Probanden und die Atemexkursionen während der Nacht aufgezeichnet.

Die Auswertung der Schlaf-EEGs erfolgte nach den allgemeingültigen Regeln von Rechtschaffen und Kales (1968), welche die folgenden Zustände bewerten: Wach, Schlafstadium 1 – 4, REM-Schlaf und Movementarousal. Dies ermöglichte die Erstellung eines Schlafprofils von jedem Probanden sowie eine Korrelation der Performance mit den Schlafstadien.

2.5 Fragebögen zu Wachheit und Schlafqualität

2.5.1 Stanford Sleepiness Scale (SSS)

Die Stanford Sleepiness Scale (SSS; siehe Anhang 8.2.1) ist eine international verbreitete Skala zur subjektiven Einschätzung der Wachheit bzw. Schläfrigkeit (Hoddes, Dement et al. 1972; 1973). Der Proband wählt aus sieben stichwortartig beschriebenen Vigilanzstufen die für ihn zum Zeitpunkt der Messung zutreffende aus. Jede dieser Stufen ist mit einer Nummer von 1 („Fühle mich aktiv, vital, voll da, hellwach“) bis 7 („Kämpfe nicht mehr gegen den Schlaf, schlafe gleich ein; traumartige Gedanken“) versehen; diese Zahl ergibt auch gleichzeitig den Wert des Scores. Die achte Stufe („Schlafe“) ergibt sich als logische Konsequenz aus der Reihenfolge der Items 1 bis 7; wird aber nicht in den Score einbezogen, da dem Probanden in diesem Fall die Testung nicht möglich ist. In der vorliegenden Studie wurde die deutschsprachige Übersetzung der SSS genutzt.

2.5.2 Eigenschaftswörterliste (N)

Die Eigenschaftswörterliste (EWL; siehe Anhang 8.2.2) dient ebenfalls der Erfassung des gegenwärtigen Wachheitszustandes. Sie beschreibt als mehrdimensionales Selbstbeurteilungsverfahren quantitativ das aktuelle Befinden (Janke und Debus 1978). Die in dieser Studie verwendete längere Form EWL-N erfasst 15 Aspekte der Befindlichkeit mithilfe von Items einer Subskala (insgesamt 161 Adjektive). Diese lassen sich sechs größeren Bereichen zuordnen, wie in Tabelle 2 dargestellt.

Der Proband beurteilt hinsichtlich einer Liste von vorgegebenen Adjektiven durch Zustimmung oder Ablehnung seine momentane Verfassung. Die Wörter sind in gemischter Reihenfolge, also nicht nach den Subskalen sortiert angeordnet.

Tabelle 2: Items der Eigenschaftswörterliste

Bereich	Subskala	
Leistungsbezogene Aktivität	A	Aktiviertheit
	B	Konzentriertheit
Allgemeine Desaktivität	C	Desaktiviertheit
	D	Müdigkeit
	E	Benommenheit
Extraversion/Introversion	F	Extravertiertheit
	G	Introvertiertheit
Allgemeines Wohlbefinden	H	Selbstsicherheit
	I	Gehobene Stimmung
Emotionale Gereiztheit	J	Erregtheit
	K	Empfindlichkeit
	L	Ärger
Angst	M	Ängstlichkeit
	N	Deprimiertheit
	O	Verträumtheit

Da für die vorliegende Studie lediglich die Aspekte von Bedeutung waren, die auf Wachheit bzw. Schläfrigkeit abzielen, wurde die EWL-N um die Kategorien der anderen Befindlichkeitsaspekte gekürzt, sodass nur die Items folgender Bereiche verwendet wurden:

A	Aktiviertheit	19 Items
B	Konzentriertheit	6 Items
C	Desaktiviertheit	16 Items
D	Müdigkeit	7 Items
E	Benommenheit	9 Items
I	Gehobene Stimmung	16 Items
J	Erregtheit	15 Items
O	Verträumtheit	10 Items

Infolgedessen ergab sich eine gekürzte EWL-N (siehe Anhang 8.2.2) mit 98 Items. Die Auswertung per Hand erfolgte mithilfe einer Schablone, die für jede Spalte die verschiedenen Buchstaben angibt, zu denen das betreffende Item gehört. Die Anzahl, der vom Probanden mit „Zustimmung“ bewerteten Items, wird für jeden Aspekt gezählt und ergibt somit den Wert des Scores für die jeweilige Subskala.

2.5.3 Pittsburgh-Schlafqualitätsindex (PSQI)

Der Pittsburgh-Schlafqualitätsindex (PSQI) wurde von Buysee et al. (1989) etabliert und dient der retrospektiven Erfassung der Schlafqualität für einen Zeitraum von vier Wochen (siehe Anhang 8.2.3). Der PSQI umfasst neben 19 Fragen zur Selbstbeurteilung weitere fünf Fragen der Fremdbeurteilung (diese kann durch Mitbewohner oder Partner erfolgen), welche jedoch nicht in die quantitative Auswertung eingeschlossen werden. Ebenso bleibt die 19. Frage nach den Wohnverhältnissen (Mitbewohner, Partner) von der Auswertung ausgenommen. Die ersten 18 Fragen erfassen, in sieben Komponenten gegliedert, die subjektive Schlafqualität, die Einschlaf latenz, die Schlafdauer und -effizienz, die Häufigkeit schlafstörender Ereignisse, die Einnahme von Schlafmedikation, sowie die Tagesmüdigkeit. Jede dieser Komponenten kann einen Wert zwischen 0 und 3 annehmen. Der durch Summation der Komponenten-Scores errechenbare Gesamtwert liegt zwischen 0 und 21, wobei höhere Werte einer verminderten Schlafqualität entsprechen. Es besteht ein empirisch bestimmter Cut-off Wert (von 5), welcher eine Einteilung in „gute“ und „schlechte“ Schläfer erlaubt (DGSM 2010). Auf der Homepage der DGSM findet sich neben dem Test auch eine Anleitung zur Auswertung bzw. ein Verarbeitungsprogramm zur Auswertung mit Windows Excel (siehe DGSM).

Die Test-Retest-Reliabilität (Stabilität) des PSQI-Gesamt-Scores liegt zwischen $r = 0.82$ (Gentili, Weiner et al. 1995) und $r = 0.89$ (Backhaus, Born et al. 2007). Der PSQI wurde bisher in insgesamt vier Studien im Hinblick auf die diagnostische Validität untersucht. Die Sensitivität des Gesamt-Scores lag hierbei immer zwischen 80% und 100% (Fichtenberg, Putnam et al. 2001). Ähnlich hoch waren die Spezifitätswerte; sie lagen zwischen 83% und 86,6% (Doi, Minowa et al. 2000).

2.6 Fragebögen zu Händigkeit und Ausschlusskriterien

2.6.1 Händigkeitstest nach Oldfield

Zur Bestimmung der Händigkeit wurde die deutsche Übersetzung des „Edinburgh Handedness Inventory“ nach Oldfield (1971) genutzt (siehe Anhang 8.2.4). Dieser erfragt 20 Items zur bevorzugt benutzten Hand in bestimmten Tätigkeiten des alltäglichen Lebens. Nicht in die Auswertung eingebunden wurde die Frage nach direkten Verwandten, welche Linkshänder sind bzw. waren.

Der Proband gibt an, ob er eine Tätigkeit „stets links“, „meist links“, „mit beiden Händen“, „meist rechts“ oder „stets rechts“ ausführt. Aus den ersten sechs Items (Schreiben, Zeichnen, Werfen, Benutzen einer Schere, Kämmen, Benutzen einer Zahnbürste und eines Messers) wird der Score nach Annett durch Zählen der, unter den Items „meistens rechts“

und „stets rechts“ getätigten, Kreuze bestimmt. Hiermit kann eine Unterscheidung zwischen „Rechtshändern“ und „Nicht-Rechtshändern“ getroffen werden.

Nach Oldfield (1971) erfolgt die Berechnung eines Lateralitätsquotienten, welcher die Händigkeit als kontinuierliche Eigenschaft zwischen ausschließlicher Rechts- und Linkshändigkeit repräsentiert, wie folgt:

$$\frac{100 \times (\text{Summe aller Kreuze bei „rechts“} - \text{Summe aller Kreuze bei „links“})}{\text{Summe aller Kreuze bei „rechts“} + \text{Summe aller Kreuze bei „links“}}$$

Der Index liegt immer zwischen -100 (ausschließliche Linkshändigkeit) und +100 (ausschließliche Rechtshändigkeit).

2.6.2 Fragebogen zu den Ausschlusskriterien

Zur besseren Bestimmung etwaiger Ausschlussgründe im Voraus, füllten die Probanden vor Beginn der Testung einen für diese Studie erstellten Fragebogen (siehe Anhang 8.2.5) aus. Hier wurden geschlossene Fragen u. a. zu Arbeit im Schichtdienst, schwerwiegenden neurologischen und/oder psychiatrischen Erkrankungen und Substanzkonsum mit „ja“ oder „nein“ beantwortet

2.7 Statistische Analysen

Die Skalen, Subscores und Summenscores wurden entsprechend der unter den Abschnitten 2.5 und 2.6 für die jeweiligen genutzten Fragebögen dargestellten, standardisierten Bewertungs-Algorithmen errechnet. Hierbei wurden aufgrund des Skalencharakters der Tests nicht-parametrische Testverfahren angewendet (s. u.).

Für die Analyse der Performance im sequenziellen Finger-Tapping-Task wurden zur Stabilisierung der Werte gegenüber einzelnen Ausreißern jeweils die Mittelwerte der vier Trials der Transfer-Sequenz und der vier Läufe der unbekannten Sequenz gebildet und die errechneten Mittelwerte zur Analyse verwendet.

Die statistischen Analysen der Geschwindigkeit und Genauigkeit im sequenziellen Finger-Tapping-Task basieren auf Varianzanalysen (ANOVA – ANalysis Of VAriance) in Verbindung mit Post hoc T-Tests, um signifikante Interaktionen zu spezifizieren. Hierbei werden die Zielvariable (abhängige Variable, in diesem Fall die metrischen Werte der Geschwindigkeit bzw. Genauigkeit) mit verschiedenen Einflussvariablen (unabhängige Variablen, in diesem Fall z.B. der Faktor „Gruppe“) gegeneinander verglichen und die Beeinflussung durch die Einflussvariablen überprüft. Durch Messwiederholungen können zusätzlich verschiedene Zeitpunkte

gegenübergestellt oder eine Interaktion, welche ein Divergieren oder Konvergieren der Testergebnisse unterschiedlicher Gruppen im Zeitverlauf untersucht, aufgedeckt werden. Die Analyse des Finger-Tappings zum Zeitpunkt des Trainings schloss einen „Gruppen“- und einen Messwiederholungsfaktor für die verschiedenen „Trials“ ein. Zur Untersuchung der Transfereffekte wurden Mittelwerte für Geschwindigkeit und Genauigkeit der vier Transfer-Trials und der vier neuen, unbekannten Sequenzen berechnet. Die darauf basierende ANOVA wurde mit der Einflussgröße des „Transfers“ (extrinsische vs. intrinsische Transformation) und mit dem Messwiederholungsfaktor „Sequenz“ (Transfer- vs. neue Sequenz) berechnet. Dieses Wahrscheinlichkeitsmodell setzt voraus, dass die erzielten Werte für die Geschwindigkeit und die Genauigkeit normal verteilt sind. Durch Berechnung wird die Zufallsvariable mit der Größe F aus einer $F_{k-1; n-k}$ - Verteilung bestimmt (wobei k = Zahl der Gruppen, n = Zahl der Messwerte). Der Wert der F -Verteilung für die gegebenen Freiheitsgrade (F -Quantil) kann in einer Fisher-Tafel nachgeschlagen werden. Dabei wurde das Signifikanzniveau auf 0,05 (und damit eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%) festgelegt.

Die Steigerungen in Geschwindigkeit und Genauigkeit der Transfer-Sequenzen nach einer Nacht mit Schlaf wurden durch Anwendung des Pearson-Korrelations-Koeffizienten mit den Schlafstadienzeiten korreliert. Dieser bestimmt ein dimensionsloses Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei mindestens intervallskalierten Merkmalen. Hierfür wurde angenommen, dass die Werte normal verteilt sind und einem linearen Zusammenhang folgen.

Der Fragebogen zur Schlafqualität (PSQI) und die Vergleiche des Probandenkollektivs bezüglich der Händigkeit wurden mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests evaluiert. Dies ist eine Erweiterung des U-Tests von Mann und Whitney für mehr als zwei Stichproben (Weiß 2005). Es ist ein parameterfreier statistischer Test, mit dem im Rahmen einer Varianzanalyse verglichen wird, ob sich verschiedene unabhängige Stichproben (Gruppen) hinsichtlich einer ordinal skalierten Variable unterscheiden. Der statistische Gruppenvergleich in Bezug auf das mittlere Alter in den verschiedenen Gruppen erfolgte mithilfe des Chi-Quadrat-Tests, hiermit wurde nach Unterschieden in der Häufigkeitsverteilung gesucht und der χ^2 -Wert nach Pearson bestimmt.

Für alle Analysen wurde ein p -Wert $< 0,05$ als signifikant gewertet.

Die statistischen Analysen entstanden mithilfe des Programms SPSS 13.0 für Windows® (www.spss.com). Für die Erstellung der Graphiken und Tabellen wurden Microsoft® Office Excel, Word 2003, SPSS 13.0 für Windows® und XACT® 4.01 genutzt.

3 Ergebnisse

3.1 Probandenkollektiv

An der vorliegenden Studie nahmen 72 Probanden im Alter von 18 bis 28 Jahren teil. Das mittlere Alter betrug 23,1 Jahre (Standardabweichung (SD) 2,5 Jahre). Alle Teilnehmer waren gesund und ohne neurologische oder psychiatrische Vorerkrankungen.

Tabelle 3 zeigt die gemittelten Werte der jeweiligen Gruppen in Bezug auf das Alter und die Werte der Händigkeitsscores. Alle Probanden waren ausnahmslos Rechtshänder nach dem „Edinburgh Handedness Inventory“ nach Oldfield (1971). Die Scores wurden, wie in Abschnitt 2.6.1 beschrieben, standardmäßig berechnet. Dabei liegt der zu erreichende Höchstwert des Scores nach Anett bei sechs Punkten (ausschließliche Rechtshändigkeit), der des Scores nach Oldfield bei +100 (ausschließliche Rechtshändigkeit). Im statistischen Gruppenvergleich zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Zusammensetzung der Gruppen ($p > 0,13$ für alle Vergleiche, siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Mittlere Scores der einzelnen Gruppen

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6	Chi ² -Wert	p-Wert
Probandenzahl	n=12	n=12	n=12	n=12	n=12	n=12	--	--
Mittleres Alter (Jahre)	25,5	20,9	23,3	21,3	22,4	23,7	93,72	0,220
Händigkeitsscore Anett (ø)	5,7	5,7	6	6	5,7	6	8,54	0,129
Händigkeitsscore Oldfield (ø)	92,4	88,9	97,1	96,9	94,1	98,1	2,88	0,718
Analyse „Alter“: Chi ² (nach Pearson)- und p- Wert aus Chi-Quadrat-Test mit Gruppe als Gruppierungsvariable und Alter als Testvariable. Analyse der Händigkeitsscores: Chi ² - und p- Werte aus Kruskal-Wallis-Test mit Gruppe als Gruppierungsvariable und jeweils mit den Testvariablen: Händigkeit nach Anett und Oldfield.								

3.2 Die Performance der Gruppen im Vergleich

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Performance zu den verschiedenen Testzeitpunkten dargestellt.

3.2.1 Performance während des Trainings

Im Verlauf des Trainings zeigten sich zwischen den sechs Gruppen keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Performance (Geschwindigkeit und Genauigkeit).

In allen Gruppen steigerte sich die Geschwindigkeit (Sequenzen pro 30 Sekunden) signifikant im Verlauf der 15 Trials, wie in Abb. 10 für die verschiedenen Gruppen dargestellt. Im ersten Trial tippten die Probanden im Mittel 10,62 Sequenzen/30 Sekunden (SD 0,60 Sequenzen/30 Sekunden). Zum Ende, also im 15. Trial, steigerte sich diese Performance auf einen Durchschnittswert von 18,14 Sequenzen/30 Sekunden (SD 0,57 Sequenzen/30 Sekunden). Eine ANOVA mit der Geschwindigkeit der 15 Trials der Trainingsphase als Messwiederholungsfaktor und den sechs Gruppen als Gruppierungsvariable zeigt eine Signifikanz für den Faktor Trial ($F = 56,52$; $p < 0,0001$), aber nicht für den Faktor Gruppe ($F = 0,57$; $p = 0,72$) und die Interaktion Geschwindigkeit x Gruppe ($F = 0,87$; $p = 0,76$).

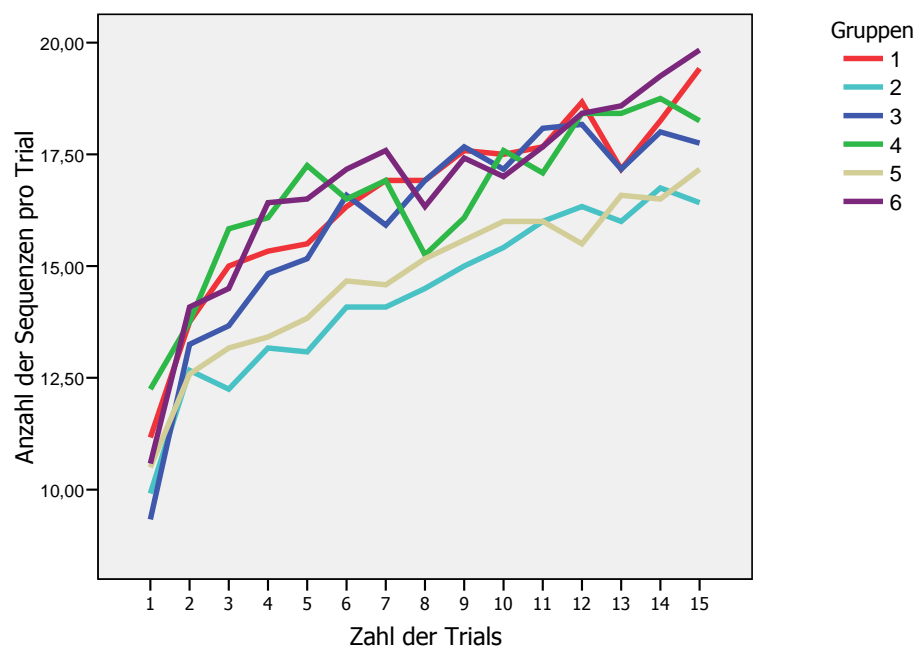


Abb. 10: Steigerung der Geschwindigkeit über die 15 Trainings-Trials.

Jeweils aufgeteilt für die einzelnen Gruppen (farbig gekennzeichnet) ist die Steigerung der Geschwindigkeit (Zahl der richtigen Sequenzen pro Trial) dargestellt.

Auch die Genauigkeit (Fehler pro Sequenz) – in Abb. 11 zur besseren Übersicht als Mittelwert aller Gruppen dargestellt – verbesserte sich signifikant im Verlauf der 15 Trials. Hier sank die Zahl der falschen Tastenanschläge von im Mittel 0,80 Fehler/Sequenz im ersten

Trial (SD 0,11 Fehler/Sequenz) auf 0,47 Fehler/Sequenz im 15. Trial (SD 0,06 Fehler/Sequenz).

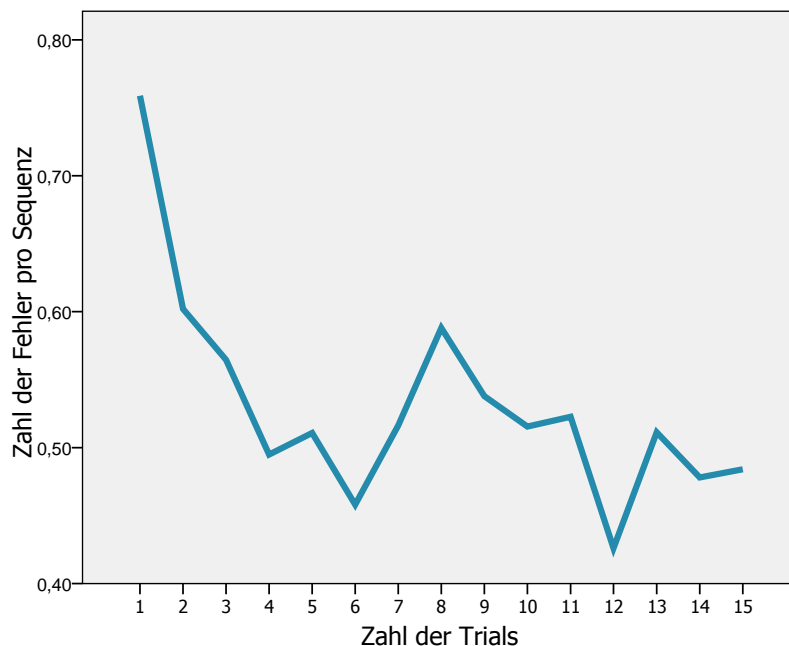


Abb. 11: Reduktion der Fehlerzahl im Lauf der 15 Trials.

Darstellung der Mittelwerte der Verbesserung in der Genauigkeit (Zahl der Fehler pro Sequenz) für alle Gruppen zusammen.

Wie eine ANOVA mit Genauigkeit als Messwiederholungsfaktor zeigt ($F = 2,20$; $p = 0,007$) gibt es keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Interaktion Genauigkeit x Gruppe ($F = 0,75$; $p = 0,93$) und zwischen den Gruppen ($F = 1,40$; $p = 0,24$).

Ebenfalls existiert kein signifikanter Effekt der Tageszeit auf die Leistung beim Training (vier Gruppen trainierten um 8.00 Uhr und zwei Gruppen um 20.00 Uhr). Zwischen den Gruppen konnte keine Differenz in Geschwindigkeit oder Genauigkeit gefunden werden ($p > 0,45$ für alle relevanten Vergleiche). Auch beim Tippen der neuen Sequenz mit der rechten Hand im Abruf (8.00 Uhr bzw. 20.00 Uhr) zeigt sich kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Geschwindigkeit oder Genauigkeit ($p > 0,25$).

Die Performance der vier verwendeten Sequenzen (I = „23142“, II = „32413“, III = „41324“, IV = „14231“) präsentiert sich sehr ähnlich. Eine ANOVA mit Geschwindigkeit oder Genauigkeit als Messwiederholungsfaktor und dem Vergleich der Sequenztypen untereinander zeigt keinen signifikanten Effekt für den Faktor Sequenztyp (Geschwindigkeit $F = 0,25$; $p = 0,86$ oder Genauigkeit $F = 0,54$; $p = 0,66$) und keine signifikante Interaktion des Sequenztyps mit dem Faktor Geschwindigkeit ($F = 0,90$; $p = 0,66$) oder Genauigkeit ($F = 0,90$; $p = 0,65$). Die Schwierigkeit der verwendeten Sequenzen ist also vergleichbar.

3.2.2 Performance des Transfers direkt nach dem Training

Die Analyse des Transfers einer motorischen Fertigkeit auf die rechte Hand direkt nach dem Training mit der linken Hand zeigt eine gesteigerte Performance im Vergleich zu einer neuen Sequenz für die Gruppe, welche die extrinsisch transferierte Sequenz im Abruf tippte (Übersicht über die Performance in Abb. 15 (Geschwindigkeit) und Abb. 16 (Genauigkeit) in Abschnitt 3.2.4). Um die Auswirkung des Lernens auf die Transfer-Sequenz von einfachen Verbesserungen der Probanden in der Fingerbeweglichkeit zu trennen, erfolgt die Analyse der Performance der Transfer-Sequenz im Vergleich zur Leistung der Probanden beim Tippen der neuen Sequenz.

Eine zweifaktorielle ANOVA für den Faktor Geschwindigkeit (der Transfer- und der neuen Sequenz) zeigt innerhalb der Gruppen und auch im Vergleich der Gruppen untereinander (jeweils für extrinsische und intrinsische Performance) eine signifikante Interaktion für Sequenz (Transfer- bzw. neue Sequenz) x Transferbedingung ($F = 5,35$; $p = 0,03$). Die Differenz der Geschwindigkeit der Transfer- und der neuen Sequenz, wie Abb. 12 darstellt, wurde mit 0,96 Sequenzen (SD 1,2 Sequenzen) für die intrinsisch aktiven Probanden berechnet ($t = 0,80$; $p > 0,4$ – nicht signifikant) und lag mit 4,27 Sequenzen (SD 0,97 Sequenzen) in den extrinsisch tippenden Gruppen signifikant höher ($t = 2,97$; $p = 0,007$).

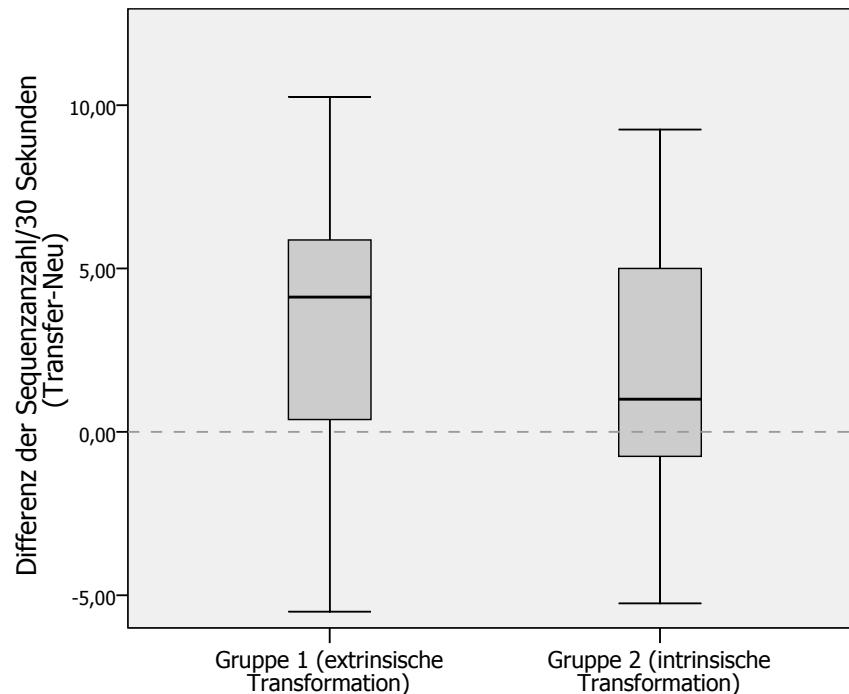


Abb. 12: Differenz der Geschwindigkeit der Gruppen 1 und 2.

Differenz der Sequenzanzahl pro 30 Sekunden für die Gruppen 1 und 2 (Abruf direkt nach dem Training). Gegenüberstellung der extrinsischen (signifikanten) und intrinsischen (nicht signifikanten) Performancesteigerung.

Im Vergleich zu den für die Geschwindigkeit gefundenen Ergebnissen ergibt die Analyse der Genauigkeit die gleichen Verbesserungen in der extrinsischen Performance, allerdings mit einer geringeren statistischen Signifikanz im Sinne eines Trends (Interaktion: Sequenz x Transfer; $F = 3,21$; $p = 0,09$). Die Differenz zwischen Transfer- und neuer Sequenz in Bezug auf die Genauigkeit lag für die extrinsische Bedingung bei $-0,16$ Fehlern/Sequenz (SD $0,73$ Fehler/Sequenz) und bei $2,7$ Fehlern/Sequenz (SD $0,41$ Fehlern/Sequenz) für die intrinsische Transferleistung. Dies ergab einen signifikanten Vorteil der extrinsischen Gruppe in der Genauigkeit des Transfers verglichen mit einer neuen Sequenz ($t = 2,34$; $p = 0,039$), nicht aber für die intrinsische Gruppe ($t = 0,75$; $p = 0,47$), wie auch Abb. 16 in Abschnitt 3.2.4 veranschaulicht.

3.2.3 Performance nach der off-line Konsolidierung über Tag

Nach einer 12 Stunden dauernden Phase des Wachseins konnte kein Beweis für eine Performancesteigerung in der Transferbedingung gezeigt werden, weder für die extrinsische noch für die intrinsische Gruppe ($p > 0,1$ für den Effekt der Sequenz und $p > 0,8$ für die Interaktion Transfer x Sequenz). In Abb. 13 ist die Differenz der Geschwindigkeit der Transfer- und der neuen Sequenz dargestellt, die bei $0,85$ Sequenzen (SD $3,35$ Sequenzen) in der intrinsischen Gruppe und bei $1,23$ Sequenzen (SD $2,59$ Sequenzen) für die extrinsische Bedingung lag ($p > 0,13$ für beide Differenzen).

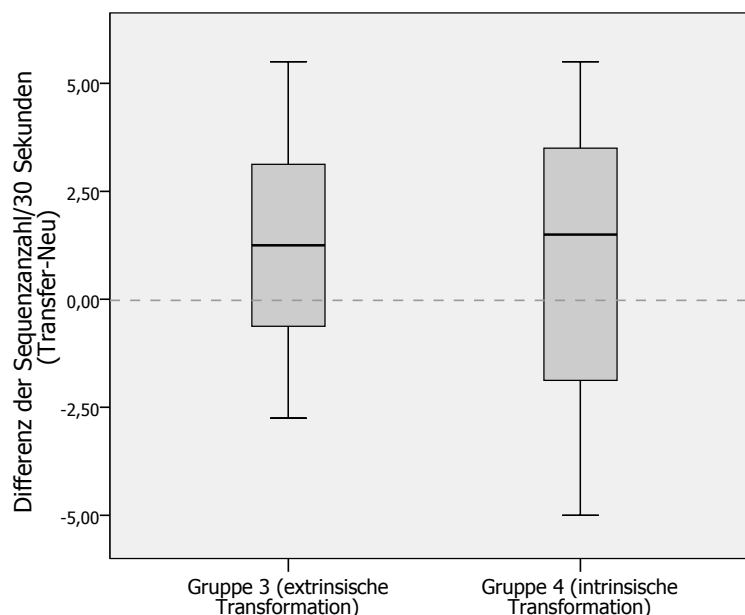


Abb. 13: Differenz der Geschwindigkeit der Gruppen 3 und 4.

Differenz der Sequenzen pro 30 Sekunden für die Gruppen 3 und 4 (Abruf nach 12 Stunden Wachsein). Gegenüberstellung der extrinsischen und intrinsischen Performancesteigerung (beide nicht signifikant).

Beide Gruppen zeigten ebenfalls keinen Vorteil in Bezug auf die Genauigkeit beim Transfer verglichen mit einer neuen Sequenz ($p > 0,2$ für die Haupt- und Interaktionseffekte, inklusive des Faktors Sequenz). Die Differenz der Genauigkeit zwischen der Transfer- und der neuen Sequenz lag in der extrinsischen Gruppe bei -0,62 Fehlern/Sequenz (SD 0,87 Fehler/Sequenz) und bei 0,07 Fehlern/Sequenz (SD 0,38 Fehlern/Sequenz) in der intrinsischen Gruppe ($p > 0,25$ für beide Differenzen).

3.2.4 Performance nach der off-line Konsolidierung über Nacht

Nach einer Nacht inklusive Schlaf (12 Stunden zwischen Training und Abruf) zeigte sich einzig die extrinsisch transformierte Bewegung signifikant verbessert (Übersicht über die Performance in Abb. 15 (Geschwindigkeit) und Abb. 16 (Genauigkeit)); wie statistisch belegt wurde durch die Signifikanz der Interaktion Sequenz x Transfer ($F = 6,05$; $p = 0,022$; $p > 0,3$ für den Haupteffekt Transfer). Die Differenz zwischen Transfer- und neuer Sequenz in Bezug auf die Geschwindigkeit, in Abb. 14 gezeigt, wurde mit -0,77 Sequenzen (SD 2,01 Sequenzen) für die intrinsisch tippende Gruppe ($p > 0,2$) und mit 2,71 Sequenzen (SD 4,47 Sequenzen) für die extrinsische Bedingung berechnet ($t = 2,26$; $p = 0,045$).

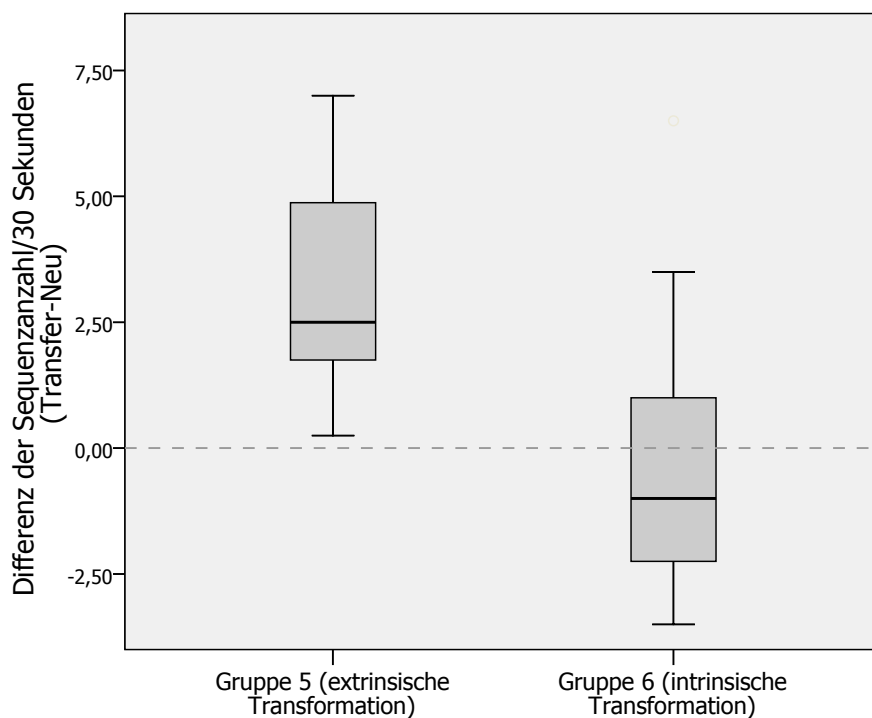


Abb. 14: Differenz der Geschwindigkeit der Gruppen 5 und 6.

Differenz der Sequenzanzahl pro 30 Sekunden für die Gruppen 5 und 6 (Konsolidierungsphase über Nacht). Gegenüberstellung der extrinsischen (signifikanten) und intrinsischen (nicht signifikanten) Performancesteigerung.

Auch die Analyse der Genauigkeit des Finger-Tappings weist diese selektive Steigerung des extrinsischen Transfers nach dem Schlaf auf. Die Differenz der Genauigkeit zwischen der transformierten und der neuen Sequenz war signifikant für die extrinsische Gruppe (0,83 Fehler/Sequenz, SD 0,24 Fehler/Sequenz; $t = 2,26$; $p = 0,045$), nicht aber für die intrinsische Gruppe (0,17 Fehler/Sequenz; SD 0,85 Fehler/Sequenz; $p > 0,2$), obwohl die Interaktion Sequenz x Transfer keine Signifikanz nachweisen konnte ($p = 0,18$).

Zusätzliche Analysen zum Vergleich dieses extrinsischen Effekts mit der akuten Steigerung direkt nach dem Training wurden angefertigt. Eine zweifaktorielle ANOVA mit der Zielvariable Geschwindigkeit und den Einflussfaktoren Sequenz und Transfer zeigt die erwartete schnellere Transferleistung der extrinsischen Bedingung beim Vergleich mit einer neuen Sequenz ($F = 21,01$; $p > 0,001$). Allerdings konnte keine signifikante Differenz in der Geschwindigkeit der Performance zwischen den Testungen nach dem Schlaf und direkt nach dem Training gezeigt werden ($p > 0,32$ für alle relevanten Vergleiche). Auch die Daten in Bezug auf die Genauigkeit lieferten keine Differenz in der Performance des extrinsischen Transfers, unabhängig davon ob die Testung nach dem Schlaf oder nach dem initialen Training stattfand ($p > 0,16$ für alle Vergleiche). Die trainingsinduzierte Leistung der extrinsischen Bewegung nach dem Training ist also vergleichbar mit dem Vorteil nach der Konsolidierung durch Schlaf.

Im direkten Vergleich der Performance des extrinsischen Transfers nach dem Schlaf mit der Performance nach einem Intervall tagsüber konnte eine signifikante Steigerung zugunsten der Performance nach dem Schlaf gesehen werden. Die ANOVA zeigt einen Haupteffekt für die Sequenz ($F = 16,34$; $p = 0,001$) und eine signifikante Interaktion Sequenz x Gruppe ($F = 5,4$; $p = 0,03$). Dies spiegelt eine signifikant größere Differenz der Performance der Geschwindigkeit zwischen der extrinsisch transformierten Sequenz und der neuen Sequenz in der Schlaf-Gruppe als der entsprechenden Differenz in der Wach-Gruppe wider. Die Analyse der Daten für die Genauigkeit zeigt keine signifikante Differenz zwischen beiden Gruppen ($p > 0,46$ für alle Vergleiche).

In der Zusammenschau stellen sich die oben genannten Ergebnisse bezüglich der Performanceänderungen in Geschwindigkeit und Genauigkeit im Vergleich der Transfer- zur neuen Sequenz zu den verschiedenen Testzeitpunkten, wie in Abb. 15 (Geschwindigkeit) und Abb. 16 (Genauigkeit) gezeigt, dar.

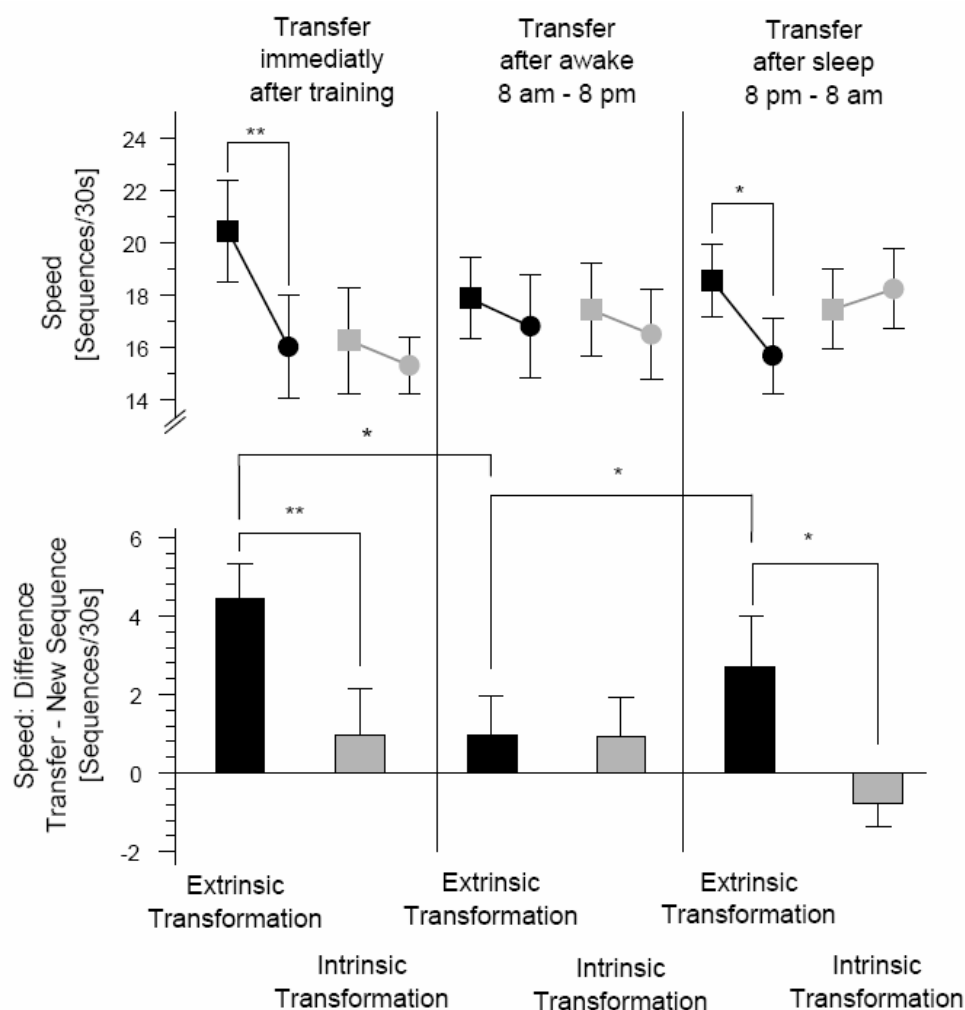


Abb. 15: Überblick über die Performance in Bezug auf die Geschwindigkeit.

Erste Spalte: Geschwindigkeit (Sequenzen pro 30 Sekunden, Differenz Sequenzanzahl pro 30 Sekunden Transfer – neue Sequenz) direkt nach dem Training. Zweite Spalte: Geschwindigkeit nach 12 Stunden Wachphase. Dritte Spalte: Geschwindigkeit nach 12 Stunden inklusive Schlaf.

Mit * sind die jeweils signifikanten Differenzen auf einem Niveau $p < 0,05$ dargestellt, mit ** sind signifikante Unterschiede auf einem Niveau $p < 0,01$ dargestellt.

Direkt nach dem Lernen der Sequenz mit der linken Hand lässt sich also eine Performancesteigerung der extrinsischen Transferbedingung in Bezug auf die Geschwindigkeit und die Genauigkeit im Vergleich zu einer neuen Sequenz erkennen. Dieser Effekt verliert sich über den Tag und ist nach 12 Stunden Wachsein tagsüber nicht mehr nachweisbar. Einen Konsolidierungsprozess sieht man nach einer Nacht, 12 Stunden inklusive Schlaf. Hier kann der Gewinn der extrinsischen Sequenz, in der Höhe vergleichbar mit dem direkt nach dem Lernen, gegenüber einer neuen Sequenz erneut gezeigt werden. Dieser Gewinn der

extrinsischen Sequenz direkt nach dem Lernen und nach 12 Stunden inklusive Schlaf ist jeweils signifikant im Vergleich zur Performance der extrinsisch transformierten Bedingung nach 12 Stunden tagsüber.

Eine signifikante Verbesserung der Performance für die intrinsisch transformierte Sequenz kann zu keinem Zeitpunkt der Testung nachgewiesen werden.

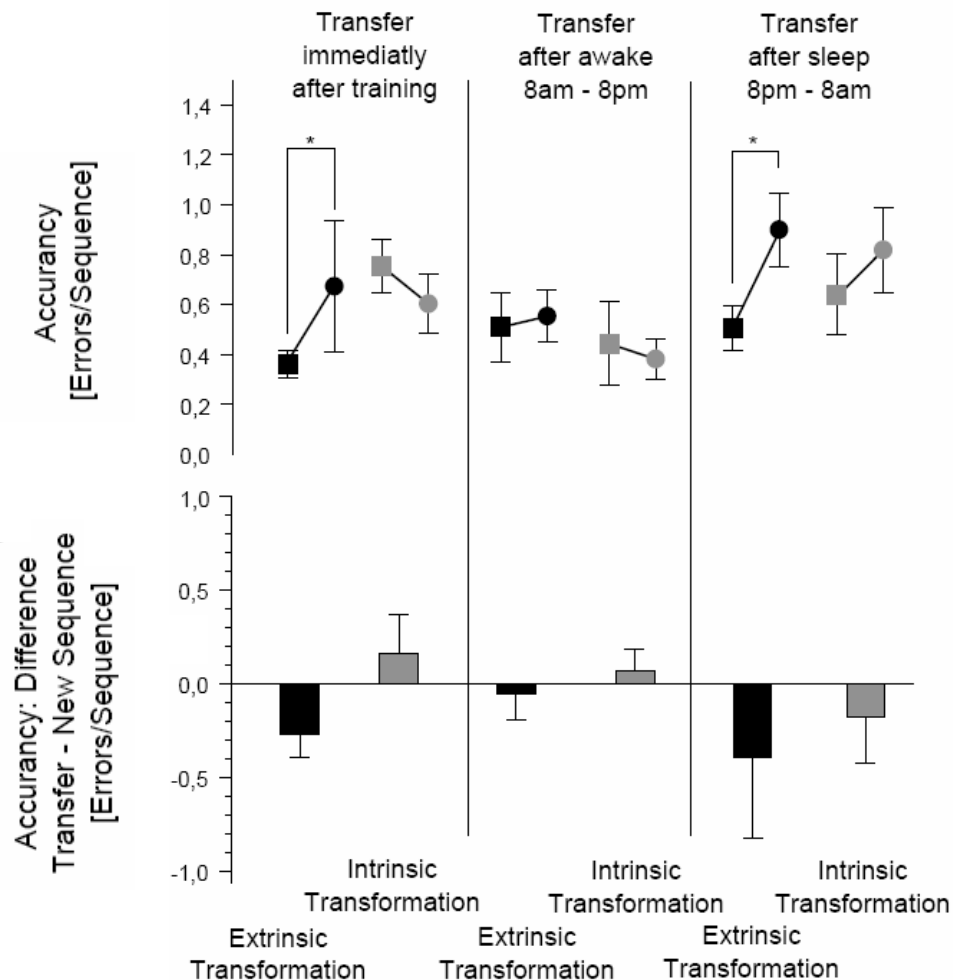


Abb. 16: Überblick über die Performance in Bezug auf die Genauigkeit.

Erste Spalte: Genauigkeit (Fehler pro Sequenz und Differenz Fehler pro Sequenz Transfer – Neue Sequenz) direkt nach dem Training. Zweite Spalte: Genauigkeit nach 12 Stunden Wachphase. Dritte Spalte: Genauigkeit nach 12 Stunden inklusive Schlaf.

Mit * sind die jeweils signifikanten Differenzen gekennzeichnet.

3.3 Schlaf und subjektive Skalen

Es folgt eine Darstellung der Skalen und Schlafdaten inklusive Vergleich der Probanden in dieser Hinsicht untereinander.

3.3.1 Aktiviertheit der Probanden nach SSS und EWL

Die Aktiviertheit aller Probanden zu den verschiedenen Testzeitpunkten war vergleichbar; wie die gemittelten Werte der Stanford Sleepiness Scale (siehe Tabelle 4) zeigen. Der niedrigste erreichbare Score liegt bei 1 („Fühle mich aktiv, vital, voll da, hellwach“), der höchste bei 7 („Kämpfe nicht mehr gegen den Schlaf, schlafe gleich ein; traumartige Gedanken“); diese Zahl repräsentiert gleichzeitig den Wert des Scores. Der Kruskal-Wallis-H-Test zeigt keine signifikanten Unterschiede (zum Zeitpunkt des Lernens: χ^2 -Wert = 4,46; $p = 0,48$; zum Zeitpunkt des Abrufs: χ^2 -Wert = 8,98; $p = 0,062$).

Tabelle 4: Gemittelte Aktivitätsgrade der Gruppen nach der SSS

Gruppenvariable	SSS Lernen	SSS Abruf
Gruppe 1	2,08	---
Gruppe 2	2,42	---
Gruppe 3	1,92	2,50
Gruppe 4	2,33	2,17
Gruppe 5	2,00	2,25
Gruppe 6	2,17	1,58

Zwischen den sechs Gruppen konnte auch in der Wortliste zur Aktivitätsbeurteilung (EWL-N) kein signifikanter Unterschied gefunden werden (Kruskal-Wallis-H-Test: $p > 0,2$ für alle Vergleiche in Training und Abruf). Die Zahl der jeweils von den Probanden für diese Kategorie als zutreffend gekennzeichneten Items ist in den unten stehenden Tabellen gezeigt, wobei Tabelle 5 die Werte zum Zeitpunkt des Trainings angibt und Tabelle 6 diese zum Zeitpunkt des Abrufs.

Tabelle 5: Gemittelte Aktivitätsgrade der Gruppen nach der EWL – Training

	EWL_N Lernen A	EWL_N Lernen B	EWL_N Lernen C	EWL_N Lernen D	EWL_N Lernen E	EWL_N Lernen I	EWL_N Lernen J	EWL_N Lernen O
Gruppe 1	10,58	4,92	2,42	1,58	,67	9,92	2,08	3,42
Gruppe 2	7,58	4,50	2,58	1,83	,42	8,08	2,58	3,42
Gruppe 3	12,25	5,50	2,00	1,50	,42	9,42	,92	2,58
Gruppe 4	9,08	4,50	2,58	1,17	,67	9,33	1,50	2,67
Gruppe 5	8,75	4,25	3,33	1,58	,75	10,33	3,17	2,67
Gruppe 6	8,08	3,83	4,33	2,83	,42	7,50	2,17	3,25
A: Aktiviertheit (19 Items), B: Konzentriertheit (6 Items), C: Desaktiviertheit (16 Items), D: Müdigkeit (7 Items), E: Benommenheit (9 Items), I: Gehobene Stimmung (16 Items), J: Erregtheit (15 Items), O: Verträumtheit (10 Items)								

Tabelle 6 zeigt die Aktivitätsgrade der Gruppen nach der EWL zum Zeitpunkt des Abrufs. Hierbei ist zu beachten, dass das Training und der Abruf für die Gruppen 1 und 2 zum gleichen Zeitpunkt stattfand; die Fragebögen zur SSS und EWL also nur einmal bearbeitet wurden und somit beide Gruppen in der Tabelle nicht aufgeführt sind.

Tabelle 6: Gemittelte Aktivitätsgrade der Gruppen nach der EWL – Abruf

	EWL_N Abruf A	EWL_N Abruf B	EWL_N Abruf C	EWL_N Abruf D	EWL_N Abruf E	EWL_N Abruf I	EWL_N Abruf J	EWL_N Abruf O
Gruppe 3	8,33	4,08	4,25	3,25	,50	8,17	1,33	2,17
Gruppe 4	6,33	3,00	3,42	2,08	,33	6,92	1,67	2,08
Gruppe 5	8,92	4,33	2,58	1,42	,42	9,08	1,25	1,42
Gruppe 6	10,67	4,42	2,75	1,50	,17	8,08	1,08	2,33
A: Aktiviertheit (19 Items), B: Konzentriertheit (6 Items), C: Desaktiviertheit (16 Items), D: Müdigkeit (7 Items), E: Benommenheit (9 Items), I: Gehobene Stimmung (16 Items), J: Erregtheit (15 Items), O: Verträumtheit (10 Items)								

3.3.2 Vergleich der Schlafqualität der Probanden nach dem PSQI

Es konnte kein signifikanter Unterschied der PSQI-Scores zwischen den sechs Gruppen nachgewiesen werden ($p > 0,5$ für alle Vergleiche). Tabelle 7 führt die mittleren Werte des PSQI-Gesamt-Scores für die jeweilige Gruppe auf. Dieser wird durch Summation der Komponenten-Scores ermittelt (siehe Abschnitt 2.5.3); der errechenbare Gesamtwert liegt zwischen 0 und 21, wobei höhere Werte einer verminderten Schlafqualität entsprechen. Der Kruskal-Wallis-H-Test zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen (χ^2 – Wert = 1,88; $p = 0,76$).

Tabelle 7: Mittlere PSQI-Scores der einzelnen Gruppen

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6
PSQI - Score	5,0	5,33	4,75	4,25	4,91	4,91

3.3.3 Vergleich der Schlafdaten

Die Analyse der Schlafprofile zeigt für alle Probanden der Gruppen 5 und 6 normalen Schlaf und keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen ($p > 0,05$ für alle t-Werte).

Im Vergleich der Schlafdaten von Gruppe 5 und 6, eine Auflistung zeigt Tabelle 8, konnten keine signifikanten Korrelationen der Schlafstadien mit den Steigerungen der extrinsischen Transformation beobachtet werden. Aber ein Trend ist für eine Korrelation der Leistungssteigerung in der extrinsischen Transferbedingung mit der Zeit, welche im Schlafstadium II verbracht wurde, vorhanden (Spearman-Rho-Koeffizient: $r = 0,56$; $p = 0,059$).

Tabelle 8: Schlafdaten der Nacht-Gruppen 5 und 6

Variable	Extrinsischer Transfer (Gruppe 5, n = 12)	Intrinsischer Transfer (Gruppe 6, n = 12)	t
Gesamt-Schlafzeit (min)	427.6 +/- 45.43	441.9 +/- 27.12	-.95
Schlafeffizienz (%)	90.7 +/- 5.59	87.1 +/- 8.64	1.26
Schlaflatenz – Stadium 1 (min)	28.2 +/- 18.55	42.7 +/- 47.40	-.98
Schlaflatenz – REM-Schlaf (min)	83.5 +/- 50.55	94.5 +/- 46.10	-.54
Wachzeit (min)	34.6 +/- 25.05	47.4 +/- 46.07	-.85
REM-Schlaf (min)	69.0 +/- 22.73	80.3 +/- 17.80	-1.40
Schlafstadium 1 (min)	42.7 +/- 12.64	43.5 +/- 13.97	-.17
Schlafstadium 2 (min)	229.4 +/- 20.83	231.0 +/- 23.15	-.18
Schlafstadium 3 (min)	51.2 +/- 18.34	46.3 +/- 15.43	.72
Schlafstadium 4 (min)	42.2 +/- 17.75	40.4 +/- 15.35	.26
Slow-Wave-Schlaf (min)	93.4 +/- 20.87	86.0 +/- 15.62	1.35
Werte sind Mittelwerte +/- SEM (Standardfehler). T-Werte aus zwei-seitiger Testung unabhängiger Stichproben. Nicht signifikante Unterschiede, $p > 0,05$ für alle t-Werte.			

4 Diskussion

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich Folgendes feststellen:

- Direkt nach dem Training steigert sich die Leistung für die extrinsisch transformierte Sequenz; das bedeutet, die motorische Fertigkeit bezogen auf die Sequenz generalisiert früh nach dem Lernen.
- Nach einem 12 Stunden dauernden Konsolidierungsprozess über Tag ist der Vorteil der extrinsischen gegenüber der intrinsischen Sequenz nicht mehr nachweisbar. Die kurz nach dem Lernen gezeigte Generalisierung ist somit labil und zerfällt im Laufe des Tages.
- Eine Konservierung des positiven Effektes für die extrinsische Sequenz wird nach der off-line Konsolidierung über Nacht (ebenfalls 12 Stunden dauernd) deutlich.

Es hat sich also gezeigt, dass die extrinsische Repräsentation einer Fertigkeit während oder bald nach dem Training gebildet wird und Schlaf die Möglichkeit hat, dies im motorischen System zu sichern. Damit nimmt dieser am Prozess der Generalisierung einer motorischen Fertigkeit teil.

4.1 Diskussion der Methodik

Im Folgenden werden mögliche Diskussionspunkte im Aufbau der Studie beleuchtet.

4.1.1 Konsolidierungsphasen über Tag

Nicht sicher ausgeschlossen werden konnte, trotz Instruktion und Erfragung durch den Studienleiter, dass die Probanden, welche morgens lernten und abends den Abruf durchführten (Gruppen 3 und 4, siehe 2.2), im Laufe des Tages geschlafen hatten. Bei diesen Testpersonen wäre allerdings zu erwarten, dass sie im Abruf ausgeruhter waren und ebenfalls die positiven Effekte der Gruppe mit der Nacht inklusive Schlaf zeigten. In den Ergebnissen ist aber keinerlei Steigerung in Geschwindigkeit oder Genauigkeit der Transferleistung im Abruf bezogen auf eine neue Sequenz zu sehen.

Ebenfalls ist es grundsätzlich möglich, dass weitere Lernphasen, trotz Hinweises, durchlaufen wurden. Gegen einen relevanten Einfluss dieses zusätzlichen Lernens auf die Ergebnisse spricht die Unwissenheit der Probanden, dass der Abruf mit der rechten Hand erfolgen sollte (und nicht mit der linken Hand, mit welcher gelernt wurde). Damit war die Wahrscheinlichkeit des Trainings mit der rechten Hand minimal. Auch hatten die oben erwähnten Gruppen

3 und 4 mit der tagsüber stattfindenden Konsolidierungsphase die beste Möglichkeit zusätzlich zu trainieren. Aber genau diese Gruppe zeigte den geringsten Transfer-Effekt. Somit ist der relevante Einfluss weiteren Trainings auf die Ergebnisse wenig wahrscheinlich.

4.1.2 Tageszeitliche Effekte auf die Performance

Ein weiteres Problem stellt sich mit den unterschiedlichen Tageszeiten, zu welchen die Probanden jeweils lernten bzw. den Abruf durchführten, dar (siehe 2.2). Auch hier könnte durch unterschiedliche Wachheit bzw. Leistungsfähigkeit ein verfälschender Effekt eingetreten sein. Drei Argumente sprechen gegen einen (relevanten) Einfluss der tageszeitlichen Effekte auf die Ergebnisse.

- (1) Vergleicht man die Leistungen der verschiedenen Gruppen beim initialen Training miteinander, so zeigen sich analoge Steigerungen der Performance unter den Probanden der einzelnen Gruppen, egal zu welcher Tageszeit (8.00 Uhr oder 20.00 Uhr) die Lernphase stattfand (siehe 3.2.1).
- (2) Auch die Leistungen in Bezug auf die neue Sequenz sind im Hinblick auf Geschwindigkeit und Genauigkeit in allen Gruppen vergleichbar.
- (3) In den Fragebögen zur Wachheit und Aktiviertheit (SSS und EWL) lässt sich kein signifikanter Unterschied im Vergleich der Gruppen untereinander finden (siehe 3.3.1).

Deshalb wird kein Anhalt für einen wesentlichen Effekt der Tageszeit auf die Leistung der Probanden gesehen.

4.1.3 Einfluss der verschiedenen Sequenzen

Da für den sequenziellen Finger-Tapping-Task vier verschiedene Ziffernfolgen, randomisiert auf die Probanden verteilt, verwendet wurden, könnte man unterschiedliche Schwierigkeitsgrade im Tippen vermuten.

Dies war jedoch im Vorfeld berücksichtigt worden, sodass nicht alle Probanden dieselbe Sequenz zu Beginn nutzten, sondern die Sequenzen über die Gruppen ausgewogen balanciert wurden. Die Gefahr der Verfälschung der Ergebnisse durch eine „leichtere“ oder „schwerere“ Fingerbewegung im Abruf bestand also nicht, denn in allen Gruppen kam jede Sequenz gleich oft als Lern- und auch als neue Sequenz vor (siehe Anhang 8.3).

Diese Bedenken erwiesen sich allerdings als unbegründet, denn im Vergleich der Performance der Probanden, getrennt nach den verschiedenen Sequenzen, waren keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf die Sequenzen festzustellen (siehe 3.2.1).

4.1.4 Einfluss der Dauer der aktiven Lernphase

Die Frage, ob eine längere Dauer der Trainingsphase zu anderen Ergebnissen im Transfer führt, kann abschließend nicht geklärt werden. In der Literatur existieren Hinweise darauf, dass die Gedächtnissysteme unterschiedlich auf längere Übungsphasen reagieren. So konnten Verwey et al. (Verwey und Wright 2004; Verwey und Clegg 2005) bei Ausweitung der Trainingsphase des SRTT auf 1060 Sequenzen veränderte Transferbedingungen, in Form von Steigerungen auch in der Performance der intrinsischen Transformation, zeigen. Im Vergleich dazu tippten die Probanden in der vorliegenden Studie nur ca. 270 Sequenzen in der Trainingsphase. Die Wirkung einer derartigen Ausweitung auf die Transformation im sequenziellen Finger-Tapping-Task müsste in weiterführenden Studien untersucht werden.

4.2 Die Transfer-Effekte im Vergleich

4.2.1 Akute Transfer-Effekte im motorischen System

Direkt nach dem Lernen mit der linken Hand zeigten sich akute Transfer-Effekte beim Tippen mit der rechten Hand für die extrinsisch transformierte Sequenz.

In einigen Untersuchungen wird der SRTT oder eine motorische Adaptationsaufgabe genutzt, um Transfer-Effekte im motorischen System zu suchen. Studien dieser Art präsentierten einen positiven Transfer-Effekt für die extrinsische Transformation, aber den meisten gelang es nicht dies auch für intrinsische Transformationen nachzuweisen (Grafton, Hazeltine et al. 2002; Perez, Tanaka et al. 2007; 2008; Willingham, Wells et al. 2000). Die Ergebnisse der hier vorgestellten Arbeit stimmen mit diesen Beobachtungen überein und bestätigen sie dadurch, dass die Verbesserung nur für die extrinsisch transformierte Bedingung gezeigt werden konnte. Hierzu wurde ein Task genutzt, welcher, im Gegensatz zum SRTT, das Lernen bewusst macht und so eine direktere Methode der Messung von motorischen Fertigkeiten darstellt (Krakauer und Shadmehr 2006). Demnach weisen die hier erfassten Ergebnisse darauf hin, dass eine extrinsische Repräsentation nicht nur für das implizite Lernen einer Sequenz, sondern auch für das explizite Lernen einer motorischen Fertigkeit direkt nach dem Training gebildet wird.

Zwei Studien konnten einen verbesserten Transfer für die intrinsische Transformation mithilfe des SRTT zeigen, aber beide Studien weiteten das Training auf 1060 Sequenzen aus (Verwey und Wright 2004; Verwey und Clegg 2005), während die Teilnehmer dieser Studie insgesamt im Mittel 270 Sequenzen trainierten. Der fehlende Beweis für die Steigerung in der Repräsentation von intrinsischen Bewegungen könnte durch das limitierte Training erklärt werden und könnte sich bei Ausweitung des Trainings abzeichnen.

Warum ist die Steigerung der Repräsentation einer extrinsisch transformierten Fertigkeit für das motorische System wichtig, wohingegen die intrinsisch transformierte Sequenz jedoch nicht direkt nach dem Training gesteigert wird?

Bei bimanuellen Aufgaben sind intrinsisch transformierte Bewegungen wesentlich einfacher auszuführen (z. B. Brustschwimmen, Schreiben auf der Tastatur) als extrinsisch transformierte Aufgaben (z. B. Öffnen einer Flasche, Spielen eines Musikinstrumentes). Um das gleiche Ziel zu erreichen sind bei letzteren verschiedene Beiträge der Extremitäten erforderlich, während erstere als zyklische Bewegungen mit der Nutzung der gleichen Muskelgruppen schneller und einfacher zu erlernen sind. Diese intrinsischen, spiegelbildlichen Bewegungen stehen im Einklang mit dem motorischen System; sie sind also „in-Phase“; ein Modus, welcher akkurater und stabiler ist und außerdem weniger Aufmerksamkeit erfordert als extrinsische Bewegungen. Letztere erfordern parallele Koordination und arbeiten gegen das innere Bewegungsmodell; sie sind also „anti-Phase“ und durch die alternierende Aktivierung verschiedener Muskeln schwerer auszuüben (Swinnen 2002).

Für die intrinsischen Bewegungen könnte deshalb ein Transfer-Modus zuständig sein, welcher im Gehirn während des unilateralen Ausführens eines Tasks kontinuierlich unterdrückt wird und so nicht ins Lernen eingreift. In diesem Fall könnte eine Steigerung der intrinsischen Bedingung nur auftreten, wenn die Hemmung dieses Transfers während des Trainings aufgehoben wird (Chan und Ross 1988; Cincotta und Ziemann 2008). Es wird angenommen, dass bei einigen neurologischen Erkrankungen, wie der Amyotrophen Lateralsklerose und beim Morbus Parkinson diese Hemmung intrinsischer „Mit“-Bewegungen weniger stark stattfindet und hierdurch Spiegelbewegungen zum Vorschein kommen (Cincotta und Ziemann 2008; Ottaviani, Tiple et al. 2008). Die Steigerung der extrinsischen Repräsentation einer Bewegung ist wichtig, um die Regel zu brechen, dass gleichphasige – hier also intrinsische – Bewegungen leichter und gegenläufige – extrinsische – Bewegungsmuster schwerer auszuführen sind und kann als aktiver Kompensationsmechanismus gesehen werden, um die Nachteile der gegenläufigen Bewegung zu minimieren.

4.2.2 Die Rolle des Tages im motorischen Transfer

Während die extrinsische Bedingung im Transfer direkt nach dem Training gesteigert wurde, konnten nach 12 Stunden über Tag weder für die extrinsisch noch für die intrinsisch transformierte Sequenz signifikante Effekte nachgewiesen werden. Die direkt nach dem Lernen gebildete, gesteigerte Leistung für die extrinsisch transformierte Sequenz verliert sich somit tagsüber und kann nicht konsolidiert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie ist dieser Verlust des motorischen Gedächtnisses nicht vollständig zu erklären. Das extensive Nutzen der Hände und Finger über den Tag könnte mit der Konsolidierung der erworbenen Fertigkeit interferieren. Um diesen Effekt genauer zu untersuchen müsste in einer weiteren Studie das Training der motorischen Fertigkeit morgens stattfinden und der Abruf (strukturiert nach dem Vorbild der vorliegenden Arbeit) 24 Stunden später am folgenden Morgen. Diese Testung wäre geeignet zur Beantwortung der Frage, ob der motorische Gedächtnispfad, welcher direkt nach dem Training angelegt wurde auch noch nach dem Tag schlafgebunden konsolidiert wird. Zusätzlich könnte mithilfe verschieden langer Konsolidierungszeiträume über Tag (Lernen morgens um 8.00 Uhr und Abruf z. B. um 10.00 Uhr, 12.00 Uhr oder 16.00 Uhr) untersucht werden, wie lange der positive Effekt direkt nach dem Lernen nachgewiesen werden kann.

Die hier gewonnenen Ergebnisse, dass eine signifikante Steigerung für die intrinsische Sequenz zu keinem Zeitpunkt der Testung nachgewiesen werden konnte, stehen im Kontrast zu einer Studie von Cohen et al. (2005), welche eine Steigerung des intrinsischen Transfers nach 12 Stunden Wachsein beschreiben. Allerdings wurde in dieser Studie der SRTT genutzt. Wie schon erwähnt, sprechen der in der vorliegenden Arbeit genutzte sequenzielle Finger-Tapping-Task und der SRTT verschiedene neuronale Systeme beim Lernen und im Abruf an. Außerdem haben Cohen et al. diesen Effekt für die Richtung des Transfers von der dominanten auf die nicht-dominante Hand untersucht, in der hier vorgestellten Arbeit wurde der entgegengesetzte Weg getestet. Die Richtung des Transfers spielt jedoch eine wichtige Rolle für die Ausprägung der Transfer-Effekte (Criscimagna-Hemminger, Donchin et al. 2003). Beide Faktoren zusammengenommen könnten so die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Studien erklären, wenngleich eine weitere Exploration dieses Aspektes gerechtfertigt scheint.

Das Ausbleiben des verbesserten Transfers nach der Konsolidierung über Tag ist ebenfalls konsistent mit einigen Studien, welche zeigten, dass eine Zeit lang Wachsein nach dem Training per se nicht ausreichend ist, um eine robuste Steigerung einer motorischen Fertigkeit in Geschwindigkeit oder Genauigkeit zu einem späteren Testzeitpunkt zu induzieren (Fischer, Hallschmid et al. 2002; Korman, Raz et al. 2003; Walker, Brakefield et al. 2002; 2003b). Die Rolle der off-line Konsolidierung von motorischen Fertigkeiten über Tag scheint auf Stabilisierung einer erworbenen Repräsentation begrenzt zu sein, welche auf die lernende Hand beschränkt sein mag und keinerlei motorische Generalisierung unterstützt (Korman, Doyon et al. 2007; Walker, Brakefield et al. 2003a).

4.2.3 Die Rolle der Nacht im motorischen Transfer

Anders als das Wachsein, hält der Nachtschlaf die Effektor-unabhängige Repräsentation, welche dem extrinsischen Transfer einer motorischen Fertigkeit zugrunde liegt, aufrecht. Die Fähigkeit, diesen Transfer in seiner Höhe im Vergleich zum direkten Transfer kurz nach dem Training zu steigern, existiert allerdings nicht. Die Sicherung der Effektor-unabhängigen Repräsentation einer extrinsisch transformierten Fertigkeit selektiv durch schlafinduzierte off-line Konsolidierung wird anhand der hier erhobenen Resultate belegt. Damit werden frühere Funde eines typischen Vorteils des Schlafs für den Transfer von extrinsisch transformierten Bewegungen im SRTT wesentlich gestärkt (Cohen, Pascual-Leone et al. 2005). Die Ergebnisse unterstreichen die Unterstützung der extrinsischen Komponente des Transfers spezifisch durch den Schlaf, da mit der vorliegenden Studie selektiver das Lernen einer motorischen Fertigkeit getestet wurde.

Verglichen mit dem intrinsischen Transfer muss berücksichtigt werden, dass der extrinsische Transfer eine ausgeweitete, unabhängigere Repräsentation erfordert. Zusätzlich muss aber ein nahes räumliches Spiegelbild für die Koordination der Fingerbewegungen bereitgestellt werden. Die off-line Konsolidierung während des Schlafes scheint die Reorganisation zugunsten der Generalisierung der motorischen Repräsentation zu ermöglichen.

Obwohl Cohen et al. (2005) eine signifikante positive Korrelation des extrinsischen Transfers mit dem REM-Schlaf-Anteil zeigten und ähnliche Assoziationen von durch den Nachtschlaf induzierten Vorteilen in anderen prozeduralen Tasks berichtet wurden (Fischer, Hallschmid et al. 2002), erlauben die hier erhobenen Daten keine Schlussfolgerungen bezüglich eines bestimmten Schlafstadiums, welches die Erhaltung der Generalisierung einer motorischen Fertigkeit begünstigt. Es konnte allerdings ein Trend für eine Korrelation zwischen den extrinsischen Transfer-Effekten und dem Non-REM-Schlafstadium II gezeigt werden. Für die Zeit, welche in diesem Schlafstadium verbracht wurde, ebenso wie für die EEG-Spindel-Aktivität während dieses Schlafstadiums konnten Wechselbeziehungen mit der off-line Steigerung einer motorischen Fertigkeit auch in verschiedenen anderen Studien gefunden werden (Fogel und Smith 2006; Walker, Brakefield et al. 2002; 2003b). Die Suppression des REM-Schlafes nach der Applikation von Antidepressiva (Fluvoxamin und Reboxetin) führt zu einem erwarteten, aber signifikanten Anstieg des schlafabhängigen Vorteils der Genauigkeit des Finger-Tippens. Diese korrelierten mit der Steigerung der Schlafspindeln im Non-REM-Schlafstadium II (Rasch, Pommer et al. 2009). Vor diesem Hintergrund passen die hier gefundenen Ergebnisse zur Annahme, dass das Non-REM-Schlafstadium II in den Prozess der off-line Konsolidierung von neu erworbenen Fertigkeiten involviert ist; ein Prozess, welcher offenbar die Repräsentation hin zur Generalisierung reorganisiert.

4.3 Fazit und Ausblick

Mit der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass die extrinsische Repräsentation einer motorischen Fertigkeit während oder direkt nach dem Training gebildet wird und dass Schlaf die Kapazität hat, dies im motorischen System zu konsolidieren. Als Schlussfolgerung lässt sich festhalten, dass Schlaf am Prozess der Generalisierung einer motorischen Fertigkeit teilnimmt.

Es wäre nun wichtig, weitere Studien zur genaueren Beleuchtung verschiedener Aspekte durchzuführen. Von besonderem Interesse sind hier folgende durch diese Ergebnisse aufgeworfene Fragestellungen:

- Wie lange kann die Konsolidierung durch Schlaf nachgewiesen werden und führt eine weitere Nacht mit Schlaf zu erneuter Veränderungen in der Performance?
- Wie lange dauert der akute Transfer-Effekt für die extrinsische Sequenz an, kommt es zu weiteren Steigerungen und ab wann setzt der Verlust über Tag ein?
- Könnte man eventuell mit ausgeweitetem Training einen Effekt für die intrinsisch transformierte Bedingung erzielen?
- Die Methodik der funktionellen Bildgebung könnte zeigen, welche Änderungen der neuronalen Aktivität durch die Konsolidierung erfolgen.

5 Zusammenfassung

An das Lernen einer motorischen Aufgabe schließt sich ein Prozess der Konsolidierung an. Das heißt, auch ohne weiteres Üben wird die beim Training vermittelte motorische Fertigkeit einer Umstrukturierung im Gehirn unterzogen. Für motorische Lernprozesse ist die schlafgebundene Konsolidierung gut belegt und die Folgen der schlafgebundenen Konsolidierung können eindrucksvoll im motorischen System nachgewiesen werden: Nur nach Schlaf kommt es zu einer signifikanten Performancesteigerung einer motorischen Fertigkeit als Ausdruck einer Konsolidierung, während in Wachphasen diese Konsolidierung nicht gelingt. Ferner stabilisiert sich durch die schlafgebundene Konsolidierung ein zunächst fragiler Gedächtnisinhalt und wird nach dem Schlaf weniger störanfällig hinsichtlich einer Beeinflussung durch Interferenz. Ein weiterer Bereich der Konsolidierung könnte die Generalisierung einer motorischen Fähigkeit sein. Hierunter versteht man den Transfer z. B. einer motorischen Fertigkeit, welche mit einer Hand gelernt wurde, auf die andere Hand. Die vorliegende Studie prüft, ob dieser Prozess der Generalisierung motorischer Fertigkeiten durch schlafgebundene Konsolidierung unterstützt wird.

Um die Frage nach einer schlafgebundenen Generalisierung motorischer Fertigkeiten zu untersuchen, wurden 72 Rechtshänder (nach dem Edinburgh Handedness Inventory nach Oldfield) – 39 Frauen und 33 Männer, 18 bis 28 Jahre, ohne neurologische oder psychiatrische Vorerkrankungen – untersucht. Die Verteilung dieser Probanden erfolgte randomisiert auf sechs Gruppen. Jeder Teilnehmer lernte zunächst mit der linken Hand eine Fingerbewegung mithilfe eines sequenziellen Finger-Tapping-Tasks. Dieser Task verwendet eine fünfstellige numerische Sequenz, die so schnell und fehlerfrei wie möglich wiederholt getippt werden soll. Die Generalisierung wurde getestet, indem die Original-Sequenz (extrinsische Transformation) oder deren gespiegelte Sequenz (intrinsische Transformation) mit der rechten Hand abgerufen wurde. Als Maß für die Generalisierung wurde die Verbesserung in Geschwindigkeit und Reduktion der Fehler im Gegensatz zu einer neuen, dem Probanden unbekannten Sequenz herangezogen, welche zum Vergleich ebenfalls mit der rechten Hand ausgeführt wurde. Je nach Gruppenzuteilung folgte direkt nach dem Lernen der Fingerbewegung oder 12 Stunden später (hier lag entweder ein Tag oder eine Nacht dazwischen) der Abruf. Zur Objektivierung der Schlafqualität und des Wachheitsgrades der Probanden zum Testzeitpunkt wurde der Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI), die Stanford Sleepiness Scale (SSS) und die Eigenschaftswörterliste (EWL-N) genutzt. Diejenigen Probanden, bei denen eine Nacht zwischen den Testphasen lag, erhielten zusätzlich eine Schlaf-

EEG-Messung (Polysomnographie). Diese wurde nach den Regeln von Rechtschaffen und Kales (1968) zur Beurteilung des Schlafprofils in der Nacht der Messung und zur Bestimmung etwaiger Korrelationen zwischen Lernerfolg und Schlafarchitektur durchgeführt. Direkt nach dem Lernen der Sequenz mit der linken Hand zeigt sich eine signifikante Performancesteigerung der extrinsischen Sequenz mit der rechten Hand. Diese verliert sich im Verlauf des Tages (nach 12 Stunden ohne Schlaf). Nach einer Nacht (12 Stunden inklusive Schlaf) dagegen, ist der Gewinn der extrinsischen Sequenz, welcher direkt nach dem Lernen vorhanden ist, wieder nachweisbar. Hier zeigt sich erneut eine signifikante Performancesteigerung der extrinsischen Sequenz gegenüber einer neuen Sequenz; in ihrer Höhe vergleichbar mit der, direkt nach dem Training. Ein Vorteil der intrinsischen Bedingung gegenüber einer neuen Sequenz ist zu keinem Zeitpunkt der Testung nachweisbar. Vergleicht man die erhobenen Daten zu Wachheit und Aktivierungsgrad der Probanden zu den verschiedenen Testzeitpunkten, so zeigt sich kein signifikanter Unterschied. In der Analyse der Schlafdaten konnte ein Trend zur Korrelation der Steigerung der Performance mit dem Anteil des Schlafstadiums II am Non-REM-Schlaf beobachtet werden.

Diese Studie untersucht erstmals die Rolle der off-line Konsolidierung in Bezug auf die Generalisierung im motorischen System anhand einer explizit erlernbaren motorischen Lernaufgabe. Während die Stabilisierung eines fragilen Gedächtnispfades in einer Wachphase stattfindet, können eine Performancesteigerung und auch – wie die vorliegende Arbeit zeigt – eine Generalisierung eines motorischen Programms nur schlafgebunden erfolgen. Kurz nach dem initialen Training und durch den schlafgebundenen Konsolidierungsprozess konnten jedoch ausschließlich extrinsisch transformierte Bewegungsmuster generalisieren. Intrinsische Bewegungsmuster sind „in der Phase“ einer Bewegung und egozentrisch auf das Gelenk- und Muskelsystem ausgerichtet. Sie sind vermutlich der „default Modus“ im motorischen System und werden aktiv inhibiert, z. B. um Spiegelbewegungen zu unterdrücken. Extrinsische, also allozentrisch konfigurierte Bewegungsmuster spiegeln die „Anti-Phase“ einer Bewegung wider und sind für das motorische System sehr viel schwieriger. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass der aktive Prozess der schlafgebundenen Konsolidierung in Form der Generalisierung extrinsisch transformierter Bewegungsmuster bevorzugt, um diesen Nachteil im motorischen System auszugleichen.

6 Veröffentlichungen

Teile dieser Arbeit wurden bereits veröffentlicht:

Publikation

Witt, K., Margraf, N., **Bieber, C.**, Born, J. und Deuschl, G. (2010). "Sleep consolidates the effector-independent representation of a motor skill." Neuroscience **171**(1): 227-234.

Vortrag

C. Bieber, N. Margraf, G. Deuschl, J. Born, K. Witt (Kiel, Lübeck). "Sleep saves the effector independent representation of a motor skill." Aktuelle Neurologie, September 2009, 36. Jahrgang, Seite 80. Supplement: 82. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Neurologie (DGN), 23.-26. September 2009 in Nürnberg

7 Literaturverzeichnis

- Backhaus, J., Born, J., Hoeckesfeld, R., Fokuhl, S., Hohagen, F. und Junghanns, K. (2007). "Midlife decline in declarative memory consolidation is correlated with a decline in slow wave sleep." Learning & Memory **14**(5): 336-341.
- Bapi, R. S., Doya, K. und Harner, A. M. (2000). "Evidence for effector independent and dependent representations and their differential time course of acquisition during motor sequence learning." Experimental Brain Research **132**(2): p. 149-162.
- Birbaumer, N. (2007). "Motor learning: passing a skill from one hand to the other." Current Biology **17**(23): p. R1024-1026.
- Brashers-Krug, T., Shadmehr, R. und Bizzi, E. (1996). "Consolidation in human motor memory." Nature **382**(6588): p. 252-255.
- Buyse, D. J., Reynolds, C. F., 3rd, Monk, T. H., Berman, S. R. und Kupfer, D. J. (1989). "The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research." Psychiatry Research **28**(2): p. 193-213.
- Chan, J. L. und Ross, E. D. (1988). "Left-handed mirror writing following right anterior cerebral artery infarction: evidence for nonmirror transformation of motor programs by right supplementary motor area." Neurology **38**(1): p. 59-63.
- Chase, C. und Seidler, R. (2008). "Degree of handedness affects intermanual transfer of skill learning." Experimental Brain Research **190**(3): p. 317-328.
- Cincotta, M. und Ziemann, U. (2008). "Neurophysiology of unimanual motor control and mirror movements." Clinical Neurophysiology **119**(4): p. 744-762.
- Cohen, D. A., Pascual-Leone, A., Press, D. Z. und Robertson, E. M. (2005). "Off-line learning of motor skill memory: a double dissociation of goal and movement." Proceedings of the National Academy of Sciences **102**(50): p. 18237-18241.
- Criscimagna-Hemminger, S. E., Donchin, O., Gazzaniga, M. S. und Shadmehr, R. (2003). "Learned dynamics of reaching movements generalize from dominant to non-dominant arm." Journal of Neurophysiology **89**(1): p. 168-176.
- Criscimagna-Hemminger, S. E. und Shadmehr, R. (2008). "Consolidation patterns of human motor memory." Journal of Neuroscience **28**(39): p. 9610-9618.
- DGSM. (2010). "Deutsche Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin: Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI)." from http://www.charite.de/dgsm/dgsm/fachinformationen_fragebogen_psqi.php?language=german.

- Diekelmann, S. und Born, J. (2007). "One memory, two ways to consolidate?" Nature Neuroscience **10**(9): p. 1085-1086.
- Doi, Y., Minowa, M., Uchiyama, M., Okawa, M., Kim, K., Shibui, K. und Kamei, Y. (2000). "Psychometric assessment of subjective sleep quality using the Japanese version of the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI-J) in psychiatric disordered and control subjects." Psychiatry Research **97**(2-3): p. 165-172.
- Fahle, M. (2005). Perzeptuelles Lernen. Neuropsychologie. Karnath H.-O., T. P. Tübingen, Springer Medizin Verlag Heidelberg: p. 617-623.
- Fichtenberg, N. L., Putnam, S. H., Mann, N. R., Zafonte, R. D. und Millard, A. E. (2001). "Insomnia screening in postacute traumatic brain injury: utility and validity of the Pittsburgh Sleep Quality Index." American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation **80**(5): p. 339-345.
- Fischer, S., Hallschmid, M., Elsner, A. L. und Born, J. (2002). "Sleep forms memory for finger skills." Proceedings of the National Academy of Sciences **99**(18): p. 11987-11991.
- Fischer, S., Nitschke, M. F., Melchert, U. H., Erdmann, C. und Born, J. (2005). "Motor memory consolidation in sleep shapes more effective neuronal representations." Journal of Neuroscience **25**(49): p. 11248-11255.
- Fogel, S. M. und Smith, C. T. (2006). "Learning-dependent changes in sleep spindles and Stage 2 sleep." Journal of Sleep Research **15**(3): p. 250-255.
- Gentili, A., Weiner, D. K., Kuchibhatla, M. und Edinger, J. D. (1995). "Test-retest reliability of the Pittsburgh Sleep Quality Index in nursing home residents." Journal of the American Geriatrics Society **43**(11): p. 1317-1318.
- Goedert, K. M. und Willingham, D. B. (2002). "Patterns of interference in sequence learning and prism adaptation inconsistent with the consolidation hypothesis." Learning & Memory **9**(5): p. 279-292.
- Grafton, S. T., Hazeltine, E. und Ivry, R. B. (1998). "Abstract and effector-specific representations of motor sequences identified with PET." Journal of Neuroscience **18**(22): p. 9420-9428.
- Grafton, S. T., Hazeltine, E. und Ivry, R. B. (2002). "Motor sequence learning with the non-dominant left hand. A PET functional imaging study." Experimental Brain Research **146**(3): p. 369-378.
- Halsband, U. und Freund, H. J. (1993). "Motor learning." Current Opinion in Neurobiology **3**(6): p. 940-949.
- Halsband, U. und Lange, R. K. (2006). "Motor learning in man: a review of functional and clinical studies." Journal of Physiology - Paris **99**(4-6): p. 414-424.

- Hikosaka, O., Nakamura, K., Sakai, K. und Nakahara, H. (2002). "Central mechanisms of motor skill learning." Current Opinion in Neurobiology **12**(2): p. 217-222.
- Hoddes, E., Dement, W. C. und Zarcone, V. (1972). "The development and use of the Stanford Sleepiness Scale (SSS)." Psychophysiology **9**, 150.
- Hoddes, E., Zarcone, V., Smythe, H., Phillips, R. und Dement, W. C. (1973). "Quantification of sleepiness: a new approach." Psychophysiology **10**(4): p. 431-436.
- Janke, W. und Debus, G. (1978). "Die Eigenschaftswörterliste (EWL)." Göttingen: Hogrefe.
- Korman, M., Raz, N., Flash, T. und Karni, A. (2003). "Multiple shifts in the representation of a motor sequence during the acquisition of skilled performance." Proceedings of the National Academy of Sciences **100**(21): p. 12492-12497.
- Korman, M., Doyon, J., Doljansky, J., Carrier, J., Dagan, Y. und Karni, A. (2007). "Daytime sleep condenses the time course of motor memory consolidation." Nature Neuroscience **10**(9): p. 1206-1213.
- Krakauer, J. W. und Shadmehr, R. (2006). "Consolidation of motor memory." Trends in Neurosciences **29**(1): p. 58-64.
- Krakauer, J. W., Mazzoni, P., Ghazizadeh, A., Ravindran, R. und Shadmehr, R. (2006). "Generalization of motor learning depends on the history of prior action." Public Library of Science - Biology **4**(10): p. 1798-1799.
- Marshall, L., Helgadottir, H., Molle, M. und Born, J. (2006). "Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory." Nature **444**(7119): 610-613.
- McGaugh, J. L. (2000). "Memory - a century of consolidation." Science **287**(5451): 248-251.
- Mednick, S. C., Nakayama, K., Cantero, J. L., Atienza, M., Levin, A. A., Pathak, N. und Stickgold, R. (2002). "The restorative effect of naps on perceptual deterioration." Nature Neuroscience **5**(7): p. 677-681.
- Muellbacher, W., Ziemann, U., Wissel, J., Dang, N., Kofler, M., Facchini, S., Boroojerdi, B., Poewe, W. und Hallett, M. (2002). "Early consolidation in human primary motor cortex." Nature **415**(6872): p. 640-644.
- Nägerl, U. V., Eberhorn, N., Cambridge, S. B. und Bonhoeffer, T. (2004). "Bidirectional activity-dependent morphological plasticity in hippocampal neurons." Neuron **44**(5): 759-767.
- Nissen, M. J. und Bullemer, P. (1987). "Attentional requirements of learning: evidence from performance measures." Cognitive Psychology **19**: p. 1-32.

- Oldfield, R. C. (1971). "The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory." Neuropsychologia **9**(1): p. 97-113.
- Ottaviani, D., Tiple, D., Suppa, A., Colosimo, C., Fabbrini, G., Cincotta, M., Defazio, G. und Berardelli, A. (2008). "Mirror movements in patients with Parkinson's disease." Movement Disorders **23**(2): p. 253-258.
- Pascual-Leone, A., Grafman, J., Clark, K., Stewart, M., Massaquoi, S., Lou, J. S. und Hallett, M. (1993). "Procedural learning in Parkinson's disease and cerebellar degeneration." Ann Neurol **34**(4): 594-602.
- Perez, M. A., Tanaka, S., Wise, S. P., Sadato, N., Tanabe, H. C., Willingham, D. T. und Cohen, L. G. (2007). "Neural substrates of intermanual transfer of a newly acquired motor skill." Current Biology **17**(21): p. 1896-1902.
- Perez, M. A., Tanaka, S., Wise, S. P., Willingham, D. T. und Cohen, L. G. (2008). "Time-specific contribution of the supplementary motor area to intermanual transfer of procedural knowledge." Journal of Neuroscience **28**(39): p. 9664-9669.
- Rasch, B., Buchel, C., Gais, S. und Born, J. (2007). "Odor cues during slow-wave sleep prompt declarative memory consolidation." Science **315**(5817): 1426-1429.
- Rasch, B., Pommer, J., Diekelmann, S. und Born, J. (2009). "Pharmacological REM sleep suppression paradoxically improves rather than impairs skill memory." Nature Neuroscience **12**(4): p. 396-397.
- Rechtschaffen, A. und Kales, A. (1968). "A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects." Maryland: N.I.H. Publication **204**.
- Robertson, E. M., Pascual-Leone, A. und Press, D. Z. (2004a). "Awareness modifies the skill-learning benefits of sleep." Current Biology **14**(3): p. 208-212.
- Robertson, E. M., Pascual-Leone, A. und Miall, R. C. (2004b). "Current concepts in procedural consolidation." Nature Reviews Neuroscience **5**(7): p. 576-582.
- Robertson, E. M., Press, D. Z. und Pascual-Leone, A. (2005). "Off-line learning and the primary motor cortex." Journal of Neuroscience **25**(27): p. 6372-6378.
- Robertson, E. M. (2007). "The serial reaction time task: implicit motor skill learning?" Journal of Neuroscience **27**(38): p. 10073-10075.
- Smith, C. (2001). "Sleep states and memory processes in humans: procedural versus declarative memory systems." Sleep Medicine Reviews **5**(6): p. 491-506.

- Spencer, R. M., Gouw, A. M. und Ivry, R. B. (2007). "Age-related decline of sleep-dependent consolidation." Learning & Memory **14**(7): 480-484.
- Squire, L. R. und Zola, S. M. (1996). "Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems." Proceedings of the National Academy of Sciences **93**(24): 13515-13522.
- Stickgold, R., James, L. und Hobson, J. A. (2000). "Visual discrimination learning requires sleep after training." Nature Neuroscience **3**(12): p. 1237-1238.
- Stickgold, R. und Walker, M. P. (2005). "Memory consolidation and reconsolidation: what is the role of sleep?" Trends in Neurosciences **28**(8): p. 408-415.
- Stickgold, R. (2005). "Sleep-dependent memory consolidation." Nature **437**(7063): p. 1272-1278.
- Swinnen, S. P. (2002). "Intermanual coordination: from behavioural principles to neural-network interactions." Nature Reviews Neuroscience **3**(5): p. 348-359.
- van Mier, H. I. und Petersen, S. E. (2006). "Intermanual transfer effects in sequential tactuomotor learning: evidence for effector independent coding." Neuropsychologia **44**(6): p. 939-949.
- Vangheluwe, S., Suy, E., Wenderoth, N. und Swinnen, S. P. (2006). "Learning and transfer of bimanual multifrequency patterns: effector-independent and effector-specific levels of movement representation." Experimental Brain Research **170**(4): p. 543-554.
- Verwey, W. B. und Wright, D. L. (2004). "Effector-independent and effector-dependent learning in the discrete sequence production task." Professional Psychology: Research and Practice **68**(1): p. 64-70.
- Verwey, W. B. und Clegg, B. A. (2005). "Effector dependent sequence learning in the serial RT task." Professional Psychology: Research and Practice **69**(4): p. 242-251.
- Walker, M. P., Brakefield, T., Morgan, A., Hobson, J. A. und Stickgold, R. (2002). "Practice with sleep makes perfect: sleep-dependent motor skill learning." Neuron **35**(1): p. 205-211.
- Walker, M. P., Brakefield, T., Hobson, J. A. und Stickgold, R. (2003a). "Dissociable stages of human memory consolidation and reconsolidation." Nature **425**(6958): p. 616-620.
- Walker, M. P., Brakefield, T., Seidman, J., Morgan, A., Hobson, J. A. und Stickgold, R. (2003b). "Sleep and the time course of motor skill learning." Learning & Memory **10**(4): p. 275-284.

- Walker, M. P., Stickgold, R., Jolesz, F. A. und Yoo, S. S. (2005). "The functional anatomy of sleep-dependent visual skill learning." Cerebral Cortex **15**(11): p. 1666-16675.
- Walker, M. P. (2005). "A refined model of sleep and the time course of memory formation." Behavioral and Brain Sciences **28**(1): p. 51-64; discussion p. 64-104.
- Weiß, C. (2005). Kapitel 11.4: Lagetests - Komplexere Methoden. Basiswissen Medizinische Statistik, Springer Medizin Verlag Heidelberg. **3. Auflage**.
- Willingham, D. B., Wells, L. A., Farrell, J. M. und Stemwedel, M. E. (2000). "Implicit motor sequence learning is represented in response locations." Memory & Cognition **28**(3): p. 366-375.
- Witt, K., Nuhsman, A. und Deuschl, G. (2002a). "Dissociation of habit-learning in Parkinson's and cerebellar disease." J Cogn Neurosci **14**(3): 493-499.
- Witt, K., Nuhsman, A. und Deuschl, G. (2002b). "Intact artificial grammar learning in patients with cerebellar degeneration and advanced Parkinson's disease." Neuropsychologia **40**(9): 1534-1540.
- Witt, K., Daniels, C., Daniel, V., Schmitt-Eliassen, J., Volkmann, J. und Deuschl, G. (2006). "Patients with Parkinson's disease learn to control complex systems - an indication for intact implicit cognitive skill learning." Neuropsychologia **44**(12): p. 2445-2451.

8 Anhang

8.1 Einverständniserklärung der Probanden

Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Teilstudie „Untersuchung von Konsolidierungsprozessen beim expliziten Lernen einer Bewegung“ des Sonderforschungsbereiches Schlaf und Plastizität

In dieser Studie wird die motorische Lernleistung gemessen. Dazu werden zwei Untersuchungszeitpunkte notwendig:

(A) Morgens und abends oder

(B) Abends und morgens

Das Los entscheidet über die Reihenfolge der Untersuchung. In der Bedingung (B) wird der Schlaf mit einem Polysomnographie-Gerät aufgezeichnet, welches am Abend bereits angelegt wird. Zudem werden Daten hinsichtlich der Schlafqualität und der Händigkeit erhoben. Nach dem Erheben der Daten werden diese anonymisiert und gespeichert.

Es besteht die Möglichkeit jederzeit die Studie zu unterbrechen oder abubrechen, ohne dass ich dieses begründen muss oder ein Nachteil für mich entsteht. Der Untersuchungsarm (A) wird mit 25,00 € und der Untersuchungsarm (B) wird mit 50,00 € honoriert.

In einem Aufklärungsgespräch mit dem Versuchsleiter hatte ich ausreichend Gelegenheit meine Fragen beantworten zu lassen.

Ich stimme zu, an dieser Studie teilzunehmen.

Kiel, den

Unterschrift des Probanden

8.2 Scores und Fragebögen

8.2.1 Stanford Sleepiness Scale (SSS)

Grad der Schläfrigkeit	Skala
Fühle mich aktiv, vital, voll da, hellwach	1
Habe einen klaren Kopf, bin aber nicht in Top-Form; kann mich konzentrieren	2
Wach, aber entspannt; reagiere, bin aber nicht so ganz da	3
Etwas benommen, schlaff	4
Benommen, verliere das Interesse am Wach bleiben, trügerisch	5
Schläfrig, benommen, kämpfe mit dem Schlaf; würde mich gerne hinlegen	6
Kämpfe nicht mehr gegen den Schlaf, schlafe gleich ein; traumartige Gedanken	7
Schlafe	X

8.2.2 Eigenschaftswörterliste (N)

Dies ist eine Liste von Wörtern, mit denen man beschreiben kann, wie man sich augenblicklich fühlt. Gehen Sie alle Wörter der Liste nacheinander durch und entscheiden Sie sofort bei jedem Wort, ob es für Ihr augenblickliches Befinden zutrifft oder nicht. Trifft das Wort für Ihr augenblickliches Befinden zu, so machen Sie bitte ein Kreuz in den Kreis hinter „trifft zu“. Trifft das Wort für Ihr augenblickliches Befinden nicht zu, so machen Sie bitte ein Kreuz in den Kreis hinter „trifft nicht zu“.

Es ist wichtig, dass Sie folgende Punkte beachten:

- Beurteilen Sie nur, wie Sie sich **augenblicklich** fühlen. Es kommt nicht darauf an, wie Sie sich allgemein oder gelegentlich fühlen, sondern ob was Wort **augenblicklich** zutrifft oder nicht.
- Überlegen Sie bitte nicht, welche Antwort den besten Eindruck machen könnte. Antworten Sie so, wie Ihr Befinden **augenblicklich** ist.
- Denken Sie nicht lange über ein Wort nach, sondern geben Sie bitte die Antwort, die Ihnen unmittelbar in den Sinn kommt.
- Sollte Ihnen die Antwort einmal schwerfallen, so entscheiden Sie sich für die Antwortmöglichkeit, die am **ehesten** zutreffen könnte.
- Bitte lassen Sie kein Wort aus. Entscheiden Sie sich immer sofort.

Bitte im Folgenden so ankreuzen: trifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
 trifft zu ☐ trifft nicht zu ☐

Dies sind einige Beispielwörter. Bearbeiten Sie bitte zuerst einmal diese.

schlapp.....	trifft zu <input type="radio"/>	trifft nicht zu <input type="radio"/>
zufrieden	trifft zu <input type="radio"/>	trifft nicht zu <input type="radio"/>
ruhig	trifft zu <input type="radio"/>	trifft nicht zu <input type="radio"/>
ungeduldig.....	trifft zu <input type="radio"/>	trifft nicht zu <input type="radio"/>

Haben Sie noch irgendwelche Fragen?

Hier noch einmal die wichtigsten Punkte:

- Antworten Sie danach, wie Sie sich augenblicklich fühlen!
- Sich sofort, möglichst schnell, bei jedem Wort entscheiden!
- Wenn die Antwort schwerfällt, für diejenige Antwortmöglichkeit entscheiden, die am ehesten zutreffen könnte!
- Kein Wort auslassen!

1	tatkräftig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
2	tiefsinnig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
3	nachlässig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
4	schläfrig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
5	froh	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
6	ruhelos	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
7	resolut	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
8	aufgeregt	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
9	blendend	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
10	todmüde	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
11	glücklich	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
12	temperamentlos	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
13	unermüdlich	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
14	wachsam	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
15	dösig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
16	teilnahmslos	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
17	eifrig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
18	benebelt	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
19	zappelig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
20	agil	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
21	romantisch	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
22	ausgezeichnet	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
23	beständig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
24	energielos	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
25	unausgeglichene	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
26	gedankenvoll	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
27	arbeitslustig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
28	zerrissen	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>

29	angenehm.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
30	abgespannt	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
31	zermürbt.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
32	arbeitsam.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
33	gedankenverloren	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
34	ausdauernd	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
35	befriedigt	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
36	erregt	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
37	angesäuselt.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
38	interessiert.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
39	unberechenbar	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
40	emsig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
41	kraftlos	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
42	berauscht.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
43	betriebsam.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
44	faul.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
45	heiter.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
46	träge	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
47	rastlos	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
48	aufmerksam	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
49	besinnlich.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
50	fähig.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
51	aktiv	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
52	unstetig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
53	beschwingt.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
54	abgearbeitet.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
55	passiv	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
56	entschieden.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
57	verträumt.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
58	tüchtig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
59	kribbelig.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
60	denkfaul.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
61	lustig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
62	bedeppert	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
63	schwerfällig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>

64	frohgemut.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
65	energisch	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
66	versonnen	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
67	übermütig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
68	gründlich.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
69	langsam.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
70	freudig.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
71	besoffen	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
72	reizbar	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
73	schöpferisch	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
74	beschaulich	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
75	geistesabwesend	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
76	erschöpft	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
77	geschäftig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
78	durchgedreht.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
79	gut gelaunt	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
80	angetrunken.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
81	lahm.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
82	nervös	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
83	müde.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
84	fröhlich	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
85	entschlussfähig.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
86	behäbig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
87	schlaftrunken	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
88	arbeitsfähig	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
89	träumerisch	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
90	zufrieden.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
91	einschläfernd.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
92	beschwipst.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
93	konzentriert.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
94	lasch.....	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
95	verkrampft	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
96	überschwänglich	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
97	sentimental	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>
98	behände	trifft zu	<input type="radio"/>	trifft nicht zu	<input type="radio"/>

Vielen Dank, der Test ist zu Ende.

Bitte beantworten Sie noch folgende Feststellungen:

- 1 Ich bin ein Mann.....trifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 2 Ich bin eine Frautrifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 3 Der Test war sehr anstrengendtrifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 4 Ich hatte Mühe, das Richtige anzukreuzentrifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 5 Der Test war nicht sehr anstrengendtrifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 6 Der Test fiel mir sehr leicht.....trifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 7 Der Test war mir zu langtrifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 8 Schulabschluss: Hauptschuletrifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 9 Schulabschluss: Mittlere Reifetrifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 10 Schulabschluss: Abitur.....trifft zu ☐ trifft nicht zu ☐
- 11 Alter in Jahren_____
- 12 Wie spät ist es?_____

8.2.3 Pittsburgh-Schlafqualitätsindex (PSQI)

Schlafqualitäts-Fragebogen (PSQI)

Die folgenden Fragen beziehen sich auf Ihre üblichen Schlafgewohnheiten und zwar nur während der letzten vier Wochen. Ihre Antworten sollten möglichst genau sein und sich auf die Mehrzahl der Tage und Nächte während der letzten vier Wochen beziehen. Beantworten Sie bitte alle Fragen.

1. Wann sind Sie während der letzten vier Wochen gewöhnlich abends zu Bett gegangen?

übliche Uhrzeit:

2. Wie lange hat es während der letzten vier Wochen gewöhnlich gedauert, bis Sie nachts eingeschlafen sind?

in Minuten:

3. Wann sind Sie während der letzten vier Wochen gewöhnlich morgens aufgestanden?

übliche Uhrzeit:

4. Wie viele Stunden haben Sie während der letzten vier Wochen pro Nacht tatsächlich geschlafen? (Das muss nicht mit der Anzahl der Stunden, die Sie im Bett verbracht haben, übereinstimmen.)

Effektive Schlafzeit (Stunden) pro Nacht:

Kreuzen Sie bitte für jede der folgenden Fragen die für Sie zutreffende Antwort an. Beantworten Sie bitte alle Fragen.

5. Wie oft haben Sie während der letzten vier Wochen schlecht geschlafen, ...

- a) ... weil Sie nicht innerhalb von 30 Minuten einschlafen konnten?

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

- b) ... weil Sie mitten in der Nacht oder früh morgens aufgewacht sind?

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

c) ... weil Sie aufstehen mussten, um zur Toilette zu gehen?	<ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> Während der letzten vier Wochen gar nicht<input type="radio"/> Weniger als einmal pro Woche<input type="radio"/> Einmal oder zweimal pro Woche<input type="radio"/> Dreimal oder häufiger pro Woche
d) ... weil Sie Beschwerden beim Atmen hatten?	<ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> Während der letzten vier Wochen gar nicht<input type="radio"/> Weniger als einmal pro Woche<input type="radio"/> Einmal oder zweimal pro Woche<input type="radio"/> Dreimal oder häufiger pro Woche
e) ... weil Sie husten mussten oder laut geschnarcht haben?	<ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> Während der letzten vier Wochen gar nicht<input type="radio"/> Weniger als einmal pro Woche<input type="radio"/> Einmal oder zweimal pro Woche<input type="radio"/> Dreimal oder häufiger pro Woche
f) ... weil Ihnen zu kalt war?	<ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> Während der letzten vier Wochen gar nicht<input type="radio"/> Weniger als einmal pro Woche<input type="radio"/> Einmal oder zweimal pro Woche<input type="radio"/> Dreimal oder häufiger pro Woche
g) ... weil Ihnen zu warm war?	<ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> Während der letzten vier Wochen gar nicht<input type="radio"/> Weniger als einmal pro Woche<input type="radio"/> Einmal oder zweimal pro Woche<input type="radio"/> Dreimal oder häufiger pro Woche
h) ... weil Sie schlecht geträumt hatten?	<ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> Während der letzten vier Wochen gar nicht<input type="radio"/> Weniger als einmal pro Woche<input type="radio"/> Einmal oder zweimal pro Woche<input type="radio"/> Dreimal oder häufiger pro Woche
i) ... weil Sie Schmerzen hatten?	<ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> Während der letzten vier Wochen gar nicht<input type="radio"/> Weniger als einmal pro Woche<input type="radio"/> Einmal oder zweimal pro Woche<input type="radio"/> Dreimal oder häufiger pro Woche

j) ... aus anderen Gründen?

Bitte beschreiben:

Und wie oft während des letzten Monats konnten Sie aus diesem Grund schlecht schlafen?

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

6. Wie würden Sie insgesamt die Qualität Ihres Schlafes während der letzten vier Wochen beurteilen?

- ☐ Sehr gut
- ☐ Ziemlich gut
- ☐ Ziemlich schlecht
- ☐ Sehr schlecht

7. Wie oft haben Sie während der letzten vier Wochen Schlafmittel eingenommen (vom Arzt verschriebene oder frei verkäufliche)?

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

8. **Wie oft hatten Sie während der letzten vier Wochen Schwierigkeiten wachzubleiben, etwa beim Autofahren, beim Essen oder bei gesellschaftlichen Anlässen?**

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

9. **Hatten Sie während der letzten vier Wochen Probleme, mit genügend Schwung die üblichen Alltagsaufgaben zu erledigen?**

- ☐ Keine Probleme
- ☐ Kaum Probleme
- ☐ Etwas Probleme
- ☐ Große Probleme

10. **Schlafen Sie allein in Ihrem Zimmer?**

- ☐ Ja
- ☐ Ja, aber ein Partner/Mitbewohner schläft in einem anderen Zimmer
- ☐ Nein, der Partner schläft im selben Zimmer, aber nicht im selben Bett
- ☐ Nein, der Partner schläft im selben Bett

Falls Sie einen Mitbewohner / Partner haben, fragen Sie sie/ihn bitte, ob und wie oft er/sie bei Ihnen folgendes bemerkt hat.

a) Lautes Schnarchen

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

b) Lange Atempausen während des Schlafes

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

c) Zucken oder ruckartige Bewegungen der Beine während des Schlafes

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

d) Nächtliche Phasen von Verwirrung oder Desorientierung während des Schlafes

- ☐ Während der letzten vier Wochen gar nicht
- ☐ Weniger als einmal pro Woche
- ☐ Einmal oder zweimal pro Woche
- ☐ Dreimal oder häufiger pro Woche

e) Oder andere Formen von Unruhe während des Schlafes

Bitte beschreiben:

Machen Sie bitte noch folgende Angaben zu Ihrer Person:

Alter: _____ Jahre

Körpergröße:

Gewicht:.....

Geschlecht: ☐ weiblich
☐ männlich

Beruf:
☐ Schüler/Student(in)
☐ Arbeiter(in)

☐ Rentner(in)
☐ selbständig
☐ Angestellte(r)
☐ arbeitslos/ Hausfrau/mann

8.2.4 Händigkeitstest nach Oldfield

Haben Sie direkte Verwandte, die Linkshänder sind oder waren? JA / NEIN

Wenn ja, welche:

Bitte kreuzen Sie Ihre präferierte Hand für folgende Aktivitäten an.

Sofern die Präferenz so stark ist, dass Sie niemals die andere Hand benutzen würden, es sei denn, Sie wären dazu gezwungen, kreuzen Sie bitte „stets links“ bzw. „stets rechts“ an. Wenn es keine Rolle spielt, welche Hand Sie benutzen, kreuzen Sie bitte „beide Seiten“ an. Manche Tätigkeiten benötigen zwei Hände, in diesen Fällen sind weitere Angaben in Klammern ergänzt. Bitte füllen Sie den Bogen vollständig aus, lassen Sie die Felder nur dann frei, wenn Sie damit keine Erfahrung haben oder dies nie tun.

	Stets Links	Meist Links	Mit beiden Händen	Meist Rechts	Stets Rechts
Schreiben					
Zeichnen					
Werfen					
Benutzen einer Schere					
Kämmen					
Benutzen der Zahnbürste					
Benutzen eines Messers (ohne zusätzliche Verwendung einer Gabel)					
Benutzen eines Messers (mit zusätzlicher Verwendung einer Gabel)					
Benutzen eines Löffels					
Benutzen eines Hammers					
Benutzen eines Schraubenziehers					
Benutzen eines Tennisschlägers					
Benutzen eines Cricketschlägers (untere Hand)					
Benutzen eines Golfschlägers (untere Hand)					
Benutzen eines Besens (obere Hand)					
Benutzen einer Gartenharke (obere Hand)					
Mit welcher Hand zünden Sie ein Streichholz an (Hand, die das Streichholz hält)?					
Mit welcher Hand öffnen Sie eine Schachtel/Joghurtbecher (Hand, die Deckel/Verschluss öffnet)?					
Mit welcher Hand halten Sie die Nähnadel?					

8.2.5 Fragebogen zu den Ausschlusskriterien

- 1) Üben Sie regelmäßig eine Tätigkeit aus, die mit dem Anschlagen von Tasten vergleichbar ist (z. B. Musiker (Klavier spielen), SekretärInnen, Computer spielen)? ja [] nein []

Wenn ja: Was? In welchem Umfang?

- 2) Gab es im Zeitraum der Durchführung des Experiments ein außergewöhnliches Ereignis (z. B. Unfall)? ja [] nein []

- 3) Arbeiten Sie im Schichtdienst mit Nachtschichten? ja [] nein []

Wenn ja: Wie lange ist die letzte Nachtschicht her?

- 4) Hatten Sie schon einmal schwerwiegende Infektionen (z. B. Enzephalitis („Kopfgrippe“), Meningitis (Hirnhautentzündung), Herpes zoster („Gürtelrose“))? ja [] nein []

Wenn ja: Wann etwa?

- 5) Hatten Sie schon einmal eine Intoxikation (z. B. durch Lacke, Gase, Co-Vergiftung)? ja [] nein []

Wenn ja: Wann etwa?

- 6) Mussten Sie schon einmal über einen längeren Zeitraum (~ ½ Jahr) Medikamente einnehmen (z. B. Beruhigungs- oder Schlafmittel)? ja [] nein []

Wenn ja: Wann etwa bzw. seit wann?

- 7) Trinken Sie Alkohol? ja [] nein []
früher schon []

Wenn ja: Was? Wie oft? Wie viel ungefähr?

- 8) Rauchen Sie? ja [] nein []
früher schon []

Wenn ja: Seit wann bzw. bis wann und wie lange? Wie viel ungefähr?

- 9) Nehmen Sie sonstige Drogen (z. B. Tabletten, Rauschgifte)?** ja [] nein []

Wenn ja: Was? Wie oft? Wie viel ungefähr?

- 10) Hatten Sie irgendwann ein Schädel-Hirn-Trauma?** ja [] nein []

Wenn ja: Wann etwa? Wodurch? Wahrgenommene Folgen?

- 11) Wurden Sie schon einmal am Kopf operiert?** ja [] nein []

Wenn ja: Wann etwa?

- 12) Leiden Sie unter neurologischen Erkrankungen (z. B. Ausfälle in Motorik oder Sensorik, Epilepsie, Multiple Sklerose, M. Parkinson, Schlaganfall)?** ja [] nein []

Wenn ja: Seit wann?

- 13) Haben Sie sich irgendwann einmal wegen einer psychischen Störung (z. B. wegen Ängsten, depressiven Verstimmungen) behandeln lassen bzw. unter einer solchen Störung gelitten?** ja [] nein []

Wenn ja: Wann etwa?

- 14) Leiden Sie an sonstigen chronischen oder akuten Erkrankungen?** ja [] nein []

Wenn ja: Was? Wie lange?

NUR GRUPPE 3 & 4:

- 15) Schlafzeit in der Nacht der Messung:** von ____ Uhr
bis ____ Uhr

8.3 Zuordnung Proband – Version

	Probanden- nummer	linke Hand lernen	rechte Hand Abruf	rechte Hand neu	linke Hand Abruf
Gruppe 1	1	II	II	III	II
EXTRINSISCH	2	I	I	III	I
	3	II	II	IV	II
	4	III	III	II	III
	5	IV	IV	I	IV
	6	IV	IV	II	IV
	7	II	II	IV	II
	8	III	III	I	III
	9	I	I	III	I
	10	III	III	I	III
	11	IV	IV	II	IV
	12	I	I	IV	I
Gruppe 2	13	IV	III	II	IV
INTRINSISCH	14	I	II	III	I
	15	I	II	III	I
	16	II	I	IV	II
	17	III	IV	I	III
	18	III	IV	II	III
	19	IV	III	II	IV
	20	III	IV	I	III
	21	II	I	III	II
	22	II	I	IV	II
	23	IV	III	I	IV
	24	I	II	IV	I
Gruppe 3	25	II	II	III	II
EXTRINSISCH	26	I	I	III	I
	27	II	II	IV	II
	28	III	III	II	III
	29	IV	IV	I	IV
	30	IV	IV	II	IV
	31	II	II	IV	II
	32	III	III	I	III
	33	I	I	III	I
	34	III	III	I	III
	35	IV	IV	II	IV
	36	I	I	IV	I

Gruppe 4	37	IV	III	II	IV
INTRINSISCH	38	I	II	III	I
	39	I	II	III	I
	40	II	I	IV	II
	41	III	IV	I	III
	42	III	IV	II	III
	43	IV	III	II	IV
	44	III	IV	I	III
	45	II	I	III	II
	46	II	I	IV	II
	47	IV	III	I	IV
	48	I	II	IV	I
Gruppe 5	49	II	II	III	II
EXTRINSISCH	50	I	I	III	I
	51	II	II	IV	II
	52	III	III	II	III
	53	IV	IV	I	IV
	54	IV	IV	II	IV
	55	II	II	IV	II
	56	III	III	I	III
	57	I	I	III	I
	58	III	III	I	III
	59	IV	IV	II	IV
	60	I	I	IV	I
Gruppe 6	61	IV	III	II	IV
MOVEMENT	62	I	II	III	I
	63	I	II	III	I
	64	II	I	IV	II
	65	III	IV	I	III
	66	III	IV	II	III
	67	IV	III	II	IV
	68	III	IV	I	III
	69	II	I	III	II
	70	II	I	IV	II
	71	IV	III	I	IV
	72	I	II	IV	I

Tabelle 9: Zuordnung Proband - Version der Sequenz.

Legende: römische Ziffern = Version der getippten Sequenz (I = „2-3-1-4-2“, II = „3-2-4-1-3“, III = „4-1-3-2-4“, IV = „1-4-2-3-1“), Probandennummern: kursive Ziffern = weibliche Probanden, nicht-kursive Ziffern = männliche Probanden.

9 Danksagung

Folgenden Personen möchte ich herzlich danken; ohne sie wäre diese Arbeit nicht entstanden:

Meinem Doktorvater Herrn PD Dr. med. Karsten Witt für die Überlassung des Themas dieser Dissertation, die erstklassige Betreuung, die zahlreichen Ratschläge und Hilfestellungen und die Unterstützung bei der statistischen Auswertung der erhobenen Daten.

Herrn Dr. med., Dipl.-psych. Nils Margraf für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit und die Einführung in die Auswertung der Schlafprofile.

Herrn Prof. Dr. med. Deuschl, Direktor der Klinik für Neurologie des Universitätsklinikums Schleswig-Holsteins, Campus Kiel, für die Möglichkeit der uneingeschränkten Durchführung dieser Arbeit in seiner Klinik.

Friederike Rautenberg für die Hilfe bei der Durchführung der Testungen und den Mitarbeitern des Schlaflabors, vor allem Anke Hoff für die Einarbeitung in die Polysomnographie.

Insbesondere allen beteiligten Probanden für ihre engagierte Teilnahme an dieser Studie.

Meiner Familie für ihre großzügige, liebevolle und geduldige Unterstützung.

Kirsten Daniela Schmidt und meiner Schwester Claudia Bieber für ihr unermüdliches Interesse und die geduldigen Korrekturen der Rechtsschreibung und Grammatik.

10 Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name	Christina Bieber
Anschrift	Preußerstraße 18, 24105 Kiel
Geburtsdatum/-ort	07.08.1983 in Ehringshausen
Familienstand	ledig

Schulbildung

Grundschule Waldgirmes	1990 – 1994
Lahntalschule Atzbach, Integrierte Gesamtschule	1994 – 2000
Goetheschule Wetzlar, Oberstufengymnasium	2000 – 2003
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife	(18.06.2003)

Hochschulstudium

Studium der Humanmedizin an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel	2003 – 2009
Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung	(19.08.2005)
Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung	(19.11.2009)

Promotion

Doktorandin der Klinik für Neurologie des UKS-H, Campus Kiel	2007 – 2010
--	-------------

Berufliche Tätigkeit

Assistenzärztin an der Klinik für Neurologie des UKS-H, Campus Kiel	seit 2010
---	-----------

Kiel, den 23.03.2010